

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**FACULTAD DE FARMACIA**  
**Departamento de Edafología**



**ESTUDIO GEOQUÍMICO DE SUELOS Y AGUAS COMO  
BASE PARA EVALUAR LA CONTAMINACIÓN:  
RELACIÓN ROCA-SUELO-AGUA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR**  
**PRESENTADA POR**

**Icíar Vázquez Garranzo**

Bajo la dirección de las doctoras  
Juana González Parra y Ana María Moreno García

**Madrid, 2009**

• **ISBN: 978-84-692-1123-6**

**© Icíar Vázquez Garranzo, 2008**

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

Facultad de Farmacia

Departamento de Edafología



**ESTUDIO GEOQUÍMICO DE SUELOS Y AGUAS COMO  
BASE PARA EVALUAR LA CONTAMINACIÓN.  
RELACIÓN ROCA-SUELO-AGUA.**

**TESIS DOCTORAL**

Memoria presentada por

**ICÍAR VÁZQUEZ GARRANZO**

para aspirar al grado de Doctor en Farmacia

Madrid, 2007



Instituto Geológico  
y Minero de España



# ESTUDIO GEOQUÍMICO DE SUELOS Y AGUAS COMO BASE PARA EVALUAR LA CONTAMINACIÓN. RELACIÓN ROCA-SUELO-AGUA.

## Directores:

Dra. Juana González Parra

Dra. Ana María Moreno García

VºBº Directora de Tesis

VºBº Directora de Tesis

Dra. Juana González Parra

Catedrática de Edafología

Facultad de Farmacia UCM

Dra. Ana Mª Moreno García

Prof. Titular de Edafología

Facultad de Farmacia UCM

Memoria presentada por:

ICÍAR VÁZQUEZ GARRANZO

Para optar al grado de DOCTOR en FARMACIA

Madrid, 2007



Instituto Geológico  
y Minero de España







## **UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

Antonio López Lafuente, Director del Departamento de Edafología de la Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense de Madrid,

CERTIFICA: Que el trabajo que constituye la presente memoria, ESTUDIO GEOQUÍMICO DE SUELOS COMO BASE PARA EVALUAR LA CONTAMINACIÓN. RELACIÓN ROCA-SUELO-AGUA, que presenta D<sup>a</sup> Iciar Vázquez Garranzo para optar al Grado de Doctor en Farmacia, han sido realizados bajo la dirección de las Dras. González Parra y Moreno García.

Y para que así conste, firmo la presente certificación en Madrid, a 5 de diciembre de 2007.

Antonio López Lafuente



***A mi hija Lucía:***

*“Contigo, todo es mucho más bonito”*



## **AGRADECIMIENTOS**

Al igual que hice en mi Memoria de Licenciatura, quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas aquellas personas que, de una forma u otra, me han prestado su apoyo durante la realización de este trabajo:

Mi más sincero agradecimiento a la Dra. D<sup>a</sup> Juana González Parra y a la Dra. D<sup>a</sup> Ana María Moreno García, directoras de esta tesis y personas a las que admiro por su dedicación y rigor en este trabajo. Por haber despertado en mí el interés en la Edafología, por todos los conocimientos y enseñanzas transmitidas durante todos estos años. Por haber confiado en mí, muchas gracias.

Especial reconocimiento a D. Angel Ilarri Junquera, Director adjunto del Departamento de Infraestructura del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), por poner a mi disposición las instalaciones y equipos del Instituto. Por su apoyo y confianza en mí, como persona y como profesional, durante todo el tiempo que llevo trabajando en el Instituto Geológico y Minero de España. Gracias.

A D<sup>a</sup> Pilar de la Fuente Briz, Jefa del Laboratorio de Aguas del IGME, por facilitarme el material necesario para la realización de este trabajo y por las oportunidades que me ha ido brindando estos años para mi desarrollo como profesional dentro del Laboratorio de Aguas.

Al Dr. D. Luis Moreno Merino, Investigador Titular del Departamento de Estudios Hidrogeológicos del IGME, por su inestimable ayuda en la elaboración del estudio de las aguas, desde un punto de vista geoquímico. Por su paciencia, buena disposición y por sus críticos pero prácticos comentarios.

Al Dr. D. Ángel Martín Serrano, jefe del Área de Cartografía del IGME, por su excelente ayuda en el trabajo de caracterización geológica de la zona de estudio, así como en la elaboración de los mapas oportunos. Agradecerle, sobre todo, el interés y ayuda prestados.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. D. Jose Ramón Quintana, Técnico de Laboratorio del Departamento de Edafología de la Facultad de Farmacia, por su buena disposición a la hora de ayudarme a realizar los análisis de espectroscopía de absorción atómica en el estudio de sorción-extracción llevado a cabo.

Al Dr. Trinidad de Torres Pérez-Hidalgo, Catedrático de la UPM y Director del Departamento de Ingeniería Geológica en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, por poner a mi disposición el laboratorio de Estratigrafía Biomolecular de la Escuela Superior de Ingenieros de Minas, para la realización de los análisis de compuestos orgánicos en aguas.

A la Dra. D<sup>a</sup>. Arantxa Díaz Bautista, Dra. Ingeniera Química del Laboratorio de Estratigrafía Biomolecular de la Escuela Técnica Superior de Minas, por su amabilidad y ayuda en la realización de los análisis de compuestos orgánicos.

A Marta Angulo y Ana M<sup>a</sup> Cabrera, por su amable y desinteresada colaboración en la elaboración del mapa climático, geológico y morfoestructural.

Al Dr. Martín Fernández, jefe del Laboratorio de Química del IGME, por su eterna amabilidad y por su ayuda prestada en el estudio espectroscópico de este trabajo.

A Paloma Navarrete Martínez, Jefa del Departamento de Calidad del IGME, por facilitarme toda la información hidrogeológica que estaba en sus manos.

Al Dr. Juan Carlos Baquero Úbeda, Dr. Ingeniero de Minas del Departamento de Ingeniería Geológica Hidrogeología de la Escuela de Minas, por sus valiosos comentarios sobre contaminación minera.

A Alberto de la Rosa Sanz y Miguel Molina Romera, agradecerles su amistosa colaboración en las tareas de muestreo.

A mis compañeros de trabajo del Laboratorio de Aguas con quienes he compartido tantas horas de trabajo, por su compañerismo y buena disposición.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Eva, Bárbara, M<sup>a</sup> José y Rita, gracias por vuestra amistad, por escucharme y animarme en los momentos precisos.

Fuera del ambiente académico, especial agradecimiento a dos personas extraordinarias: mis padres, de los que me siento profundamente orgullosa, y a mis cinco hermanos, a los que admiro y quiero: Maite, Fernando, Javier, Jorge y Belén.

A mi mejor amiga Ana y a mi gran amiga Oliva, por los momentos vividos juntas y por estar ahí siempre que os he necesitado.

Por último a mi marido César, gracias por permanecer a mi lado todos estos años mostrándome siempre apoyo y cariño. Por nuestra hija Lucía, por las miles de cosas que me hace sentir.





## ***ÍNDICE GENERAL***



INDICE GENERAL

JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	23
JUSTIFICATION AND AIMS OF THE WORK.....	29
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1. Características geológicas de la zona.....</b>	<b>37</b>
1.1.1. Antecedentes.....	37
1.1.2. Introducción.....	39
1.1.3. Morfoestructurado y modelado.....	39
1.1.4. Litología y estructura.....	43
1.1.5. Principales características del sustrato geológico del muestreo.....	46
<b>1.2. Climatología.....</b>	<b>50</b>
1.2.1. Introducción.....	50
1.2.2. Datos climáticos de la zona.....	51
<b>1.3. Vegetación de la zona de estudio.....</b>	<b>54</b>
<b>1.4. Asociaciones de suelo de la zona de estudio.....</b>	<b>57</b>
1.4.1. Cambisoles.....	57
1.4.2. Leptosoles.....	58
1.4.3. Regosoles.....	58
1.4.4. Luvisoles.....	59
1.4.5. Fluvisoles.....	60
<b>1.5. Influencia de factores ambientales en la geoquímica de suelos y aguas.....</b>	<b>60</b>
1.5.1. Contaminación medioambiental en suelos.....	60
1.5.1.1. Fuentes y riesgos de contaminación.....	62
1.5.1.2. Calidad del suelo y valores de referencia.....	64
1.5.2. Contaminación medioambiental en aguas superficiales.....	68
1.5.2.1. Fuentes de contaminación.....	68
1.5.2.2. Factores medioambientales que controlan la composición de las aguas naturales....	70
1.5.2.3. Distribución de las especies metálicas en solución.....	71
1.5.2.4. Relación calidad agua-litología.....	72
<b>1.6. Legislación medioambiental en suelos.....</b>	<b>79</b>
1.6.1. Legislación europea.....	79
1.6.2. Legislación estatal española.....	80
1.6.3. Legislación de la Comunidad Autónoma de Madrid.....	82
<b>1.7. Legislación medioambiental en aguas.....</b>	<b>84</b>
1.7.1. Legislación europea.....	84
1.7.2. Legislación estatal española.....	86
1.7.3. Legislación de la Comunidad Autónoma de Madrid.....	88
BIBLIOGRAFÍA.....	89

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

<b>2.1. Localización de las muestras</b>	<b>95</b>
2.1.1. Toma de muestras	95
2.1.2. Secuencia de muestreo	96
<b>2.2. Descripción de las muestras de suelos y aguas</b>	<b>99</b>
2.2.1. Información acerca de los puntos de muestreo	99
2.2.2. Información general de las muestras de suelo, roca y agua	128
<b>2.3. Métodos de análisis</b>	<b>133</b>
2.3.1. Métodos analíticos de caracterización del suelo y agua	133
2.3.1.1. Análisis físico-químico del suelo	133
2.3.1.1.1. Análisis granulométrico	133
2.3.1.1.2. Color	134
2.3.1.1.3. pH y conductividad	134
2.3.1.1.4. Carbonatos	135
2.3.1.1.5. Materia orgánica	135
2.3.1.1.6. Óxidos de hierro y manganeso	135
2.3.1.1.7. Contenido en elementos	136
2.3.1.1.8. Métodos para el estudio de sorción-extracción en suelos	141
2.3.1.1.8.1. Sorción	141
2.3.1.1.8.2. Extracción	142
2.3.1.2. Análisis físico-químico del agua	142
2.3.1.2.1. pH y conductividad	142
2.3.1.2.2. Índice de permanganato	143
2.3.1.2.3. Residuo total a 180°C	143
2.3.1.2.4. Cianuros	144
2.3.1.2.5. Sílice	144
2.3.1.2.6. Amonio	144
2.3.1.2.7. Dureza	145
2.3.1.2.8. Contenido de aniones y cationes	145
2.3.1.2.9. Contenido de elementos	147
2.3.1.2.10. Compuestos orgánicos	149
2.3.1.2.11. Elementos radiactivos	152
2.3.2. Tratamiento estadístico de los datos de análisis	154
2.3.2.1. Análisis univariante	154
2.3.2.2. Análisis multivariante	155
2.3.2.2.1. Análisis de conglomerados jerárquicos (Cluster)	155
2.3.2.2.2. Análisis de componentes principales	156
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>157</b>

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>3.1. Estudio de los suelos</b>	<b>161</b>
Parámetros edáficos	161
Textura	161
pH y conductividad	163
Componentes orgánicos	165
Carbonatos	165
Contenidos de elementos en suelos	166
Índice de alteración Fe libre/Fe total	169
Índices de acumulación edáfica y factor de enriquecimiento	170
Estudio estadístico	173
Análisis univariante	173
Análisis multivariante	176
Análisis de coeficientes de correlación	180
Valores de referencia	182
Consideración preliminar	182
Valores de referencia propuestos	184
<b>Comportamiento del suelo frente a aportes de níquel</b>	<b>187</b>
Introducción	187
Isotermas de sorción	189
Valores de coeficientes de distribución ( $K_d$ )	191
Isotermas y porcentajes de extracción	193
Correlación entre Ni sorbido-extraído y parámetros edáficos	195
<b>Estudio de las aguas</b>	<b>198</b>
Consideración preliminar	198
Caracterización física y composición química	201
Componentes orgánicos	209
Contenidos de elementos	210
Características radiactivas	213
Representación gráfica de iones mayoritarios	214
Relaciones iónicas	218
Análisis estadístico multivariante	220
Análisis de conglomerados	222
Análisis de componentes principales	225
Análisis de coeficientes de correlación	228
Origen de la mineralización	231
Relación agua-suelo-roca	234

BIBLIOGRAFÍA	238
--------------	-----

<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>243</b>
<b>5. ANEXOS.....</b>	<b>249</b>
<b>Anexo 1.....</b>	<b>249</b>
Índice de Tablas y Figuras	
<b>Anexo I.....</b>	<b>255</b>
Resultados analíticos obtenidos de parámetros edáficos. Primer muestreo.	
<b>Anexo II.....</b>	<b>259</b>
Resultados analíticos obtenidos de parámetros edáficos. Segundo muestreo.	
<b>Anexo III.....</b>	<b>263</b>
Contenidos totales de elementos en horizonte superficial, subsuperficial y roca. Primer muestreo	
<b>Anexo IV.....</b>	<b>267</b>
Contenidos totales de elementos en horizonte superficial, subsuperficial. Segundo muestreo	
<b>Anexo V.....</b>	<b>269</b>
Indices de acumulación edáfica y factores de enriquecimiento.	
<b>Anexo VI.....</b>	<b>271</b>
Estadísticos descriptivos de elementos en horizonte superficial y subsuperficial. Primer muestreo.	
<b>Anexo VII.....</b>	<b>273</b>
Estadísticos descriptivos de elementos en horizonte superficial y subsuperficial. Segundo muestreo.	
<b>Anexo VIII.....</b>	<b>275</b>
Estadísticos descriptivos obtenidos de índices de acumulación edáfica y factores de enriquecimiento.	
<b>Anexo IX.....</b>	<b>277</b>
Coeficientes de correlación obtenidos en horizonte superficial y subsuperficial.	
<b>Anexo X.....</b>	<b>279</b>
Resultados obtenidos en el estudio de sorción. Muestras IV.	
<b>Anexo XI.....</b>	<b>283</b>
Resultados obtenidos en el estudio de sorción. Muestras IG.	
<b>Anexo XII.....</b>	<b>287</b>
Resultados obtenidos en el estudio de desorción. Muestras IV.	
<b>Anexo XIII.....</b>	<b>291</b>
Resultados obtenidos en el estudio de desorción. Muestras IG.	
<b>Anexo XIV.....</b>	<b>293</b>
Balances iónicos de las muestras de agua. Primer muestreo.	
<b>Anexo XV.....</b>	<b>303</b>
Balances iónicos de las muestras de agua. Segundo muestreo.	

<b>Anexo XVI.....</b>	<b>311</b>
-----------------------	------------

Matrices de correlación de elementos mayoritarios y de relaciones iónicas en aguas. Primer y segundo muestreo.

<b>Anexo XVII.....</b>	<b>313</b>
------------------------	------------

Matrices de correlación entre muestras de agua-suelo-roca.





# **JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO**



El suelo y el agua son recursos naturales escasos y “renovables”, el primero de ellos en periodos de tiempo muy largos, que se ven afectados cada vez más por la actividad antropogénica.

La política de suelos y aguas contaminados se ha convertido en una prioridad en países donde la continua expansión urbana exige una garantía de calidad, tanto para la salud humana como para el medio ambiente. De ahí la necesidad de elaborar métodos y procedimientos que faciliten la investigación y evaluación de la calidad del suelo y agua.

Se entiende por contaminación la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía, o inducir condiciones en el medio que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica.

Considerando que la contaminación del suelo es consecuencia directa de la actividad humana, que da lugar a un incremento de los contenidos de determinadas sustancias en el suelo, así como a la presencia en el mismo de sustancias que no aparecen naturalmente, se hace inevitable determinar la situación inicial del suelo, esto es, aquella que no se ha visto afectada por dicha actividad (IHOBE, 1994).

A partir de los contenidos totales determinados en el material original y en los horizontes del suelo sin contaminar, se puede estimar si han existido aportes consecuencia de actividades humanas en otros suelos de la zona o en otros desarrollados sobre el mismo material y con semejantes características (Vázquez, 1999, BOE 15/2005).

Este trabajo, precisamente, tiene como objetivo reconocer la situación natural de los suelos de la zona nororiental de la Comunidad de Madrid, es decir, establecer las concentraciones de los diferentes compuestos inorgánicos de los suelos y su variabilidad espacial en el ámbito geográfico definido (nivel de referencia). Si se supera este nivel, puede afirmarse que el suelo está afectado, mientras, que en caso contrario, no entraña riesgo alguno.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que el riesgo que un elemento puede tener no depende sólo de la concentración total, sino también de la naturaleza y proporción de formas disponibles, parámetros que habría que tener en cuenta para llevar a cabo un estudio completo de contaminación del suelo y análisis de riesgos.

Para demostrar que el riesgo de un elemento no depende de la concentración total, se ha realizado un estudio de contaminación de los suelos muestreados, aportando diferentes concentraciones de un elemento en solución, determinando los contenidos extraídos en los suelos y comparándolos con el contenido extraído en un suelo con un contenido natural elevado.

## JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO

---

Los índices de acumulación edáfica o de enriquecimiento reflejan la distribución de elementos en el suelo y orientan sobre los procesos edafogenéticos que han tenido lugar en una zona determinada. De estos procesos, algunos son los mismos que controlan la composición natural del agua y, por tanto, puede afirmarse que existe una relación considerable entre la química del agua y la química del suelo.

Existen numerosas razones por las que se puede estudiar la composición química de un agua, por ejemplo, para determinar su uso como agua de bebida, su uso para riego o para un uso industrial general. El establecimiento de la calidad química del agua, por tanto, se basa en su comparación con indicadores de acuerdo con los requerimientos de uso de dicha agua.

Sin embargo, el conocimiento de la calidad del agua es de vital importancia, no sólo por su posible utilización, sino también por la información que proporciona sobre su origen. Así, su composición química aporta información sobre su origen, tipos de roca que ha atravesado, trayectoria e incluso edad.

En este trabajo, precisamente, se ha estudiado la composición química, con el fin de relacionar la litofacies-zona no saturada-calidad del agua en la cuenca hidrográfica del río Jarama, mayor afluente del Tago por su margen derecha, que se extiende a lo largo de 11.597 km<sup>2</sup>, en las provincias de Madrid y Guadalajara.

El estudio geoquímico de este río presenta un gran interés ya que en su cuenca se encuentran importantes núcleos de población, zonas industrializadas y zonas tradicionalmente agrícolas. Por tanto, la composición geoquímica natural de las aguas de esta cuenca pueden verse afectadas por vertidos industriales y/o aguas de retorno agrícola. Este hecho, junto con la existencia de numerosos embalses de abastecimiento y riego, pueden enmascarar el régimen natural de caudales e incluso la propia composición de las aguas.

Se ha considerado que el río Jarama es un modelo adecuado para el estudio de la relación litofacies-zona no saturada-agua, para lo cual ha sido necesario el estudio de la composición química del agua del río Jarama, arroyos y aguas de escorrentía cercanas a los puntos de muestreo de los suelos.

Los objetivos generales del estudio de los suelos han sido:

- Establecer los valores de referencia de elementos traza a partir de la determinación de los valores de fondo.
- Demostrar las diferencias de disponibilidad entre el contenido de un elemento aportado al suelo y el contenido litogénico del mismo en suelo.

Los objetivos generales del estudio de las aguas han sido:

- Establecer la calidad química del agua en base a su comparación con indicadores de acuerdo con los requerimientos de uso de dicha agua.
- Relacionar la calidad aguas analizadas con la litología de la cuenca, es decir, considerar qué procesos han llevado a la composición actual de las aguas.

Para la consecución de estos objetivos generales ha sido necesario realizar previamente:

- El estudio y caracterización geoquímica de los suelos desarrollados a partir de las principales litologías de la zona.
- Establecer los Índices de Acumulación Edáfica de elementos desarrollados a partir de estas litologías.
- Determinar las características físicas y composición química de las muestras de agua y clasificar cada tipo de agua, según los iones predominantes.
- Establecer algunas relaciones iónicas que permitan comprender las reacciones físico-químicas que afectan a las aguas.
- Un estudio estadístico, tanto en suelos como en aguas, para evaluar la homogeneidad de las variables y casos, así como sus relaciones con el objetivo de buscar correlaciones de interés.



# **JUSTIFICATION AND AIMS OF THE WORK**





Soil and water are natural limited and “renewable” resources (the first one in a very long period of time) that are increasingly affected by human activity.

Contaminated soils and waters policy has turned into a priority in countries where the continuous urban expansion demands the guarantee of quality, both for the human health and for the environment.

From that it follows the need to elaborate methods and procedures that facilitate the investigation and evaluation of the soil and water quality.

Pollution is defined as the action and the effect of introducing materials or energy forms, or the induction of conditions in the environment that, in a direct or indirect way, involve a harmful alteration of its quality in relation with the later uses or with its ecological function.

Considering that pollution of soil is a direct consequence of human activity, which brings to an increase of the contents of certain substances in the soil, as well as to the presence of substances that do not appear naturally in it, it becomes inevitable to determine the initial situation of the soil, this is, that one that has not been affected by the above mentioned activity (IHOBE, 1994).

From the total contents determined in the original material and in the horizons of the soil without contaminating, it is possible to estimate if there have been contributions as a consequence of human activities in soils of the zone or in others developed on the same material and with similar characteristics (Vázquez, I., 1999, BOE, 15/01/2005).

This work has, in fact, the aim of recognize the natural situation of the soils of the North-East zone of the Community of Madrid, that is, to establish the concentrations of the different inorganic compounds of the soils and its spatial variability within a defined geographical area (reference value). If this level is exceeded we can affirm that the soil is affected by pollution whereas in opposite case, there is no risk.

On the other hand, it is necessary to bear in mind that the risk that an element may have does not only depend on the total concentration but also on the nature and proportion of available forms, which would be necessary to consider in order to carry out a complete study of soil pollution and analyse of risks.

In order to demonstrate that the risk does not only depend on the total concentration, a study of pollution of the sampled soils has been carried out by adding different concentrations of an element in solution, determining the contents extracted in the soil and finally comparing them with the content extracted in a soil with a natural high content.

## JUSTIFICATION AND AIMS OF THE WORK

---

Pedological accumulation or enrichment indexes reflect the distribution of elements in the soil and orientate on the pedological processes that have taken place in a defined zone. Some of these processes are the same that control the natural composition of the water and, therefore, one can state that a considerable relation among the chemistry of the water and the chemistry of the soil exists.

There are lots of reasons for which it is possible to study the chemical composition of water, for example, to determine its drinking use, irrigation use or for a general industrial use. The establishment of the chemical quality of the water is therefore based on its comparison by indicators according to the requirements of use.

The knowledge of the water quality performs vital importance, not only for its possible utilization, but also for the information that it provides about its origin. This way, the chemical composition brings information about origin, types of rock that it has been passed through, path and even about the data-age.

This work has just studied the chemical composition of the sampled waters in order to relate litology-non saturated zone and water quality. The hydrographical basin of the Jarama River, major tributary of the Tagus in its right edge, spreads along 11.597 km<sup>2</sup>, in the provinces of Madrid and Guadalajara.

The geochemical study of this river represents a great interest since in his basin there are important urban centers, industrialized zones and traditionally agricultural zones. Therefore, the geochemical natural composition of the waters of this basin may be affected by industrial wastes and / or by the return of agricultural waters. This fact, together with the existence of numerous reservoirs of supply and irrigation, can mask the natural flow-system and even the own water composition.

The Jarama river has been considered a suitable model for the study of litology-non saturated zone- water relationship, for which it has been necessary the study of the chemical composition of the water of the river Jarama, streams and run-offs near to the points of sampled soils.

The general objectives of the soils study have been:

- To establish the reference value of trace elements from the determination of background values.
- To demonstrate the availability differences between an added element to a soil and its litogenic content in soil.

The general objectives of the waters study have been:

- To establish the chemical quality of water based on its comparison with indicators according with the use requirements of this water.
- To relate the quality of the analysed waters with the basin litology, that is, to consider which processes have brought to the current water composition.

In order to achieve these general objectives, it has been necessary to do previously:

- The soil study and geochemical characterization of soils developed over the principal litologies of the zone.
- To establish pedological accumulation indexes of elements in soils developed from this litologies.
- To determine physical characteristics and chemical composition of water samples and to classify each type of water depending on the major ions presence.
- To establish some ionic relationships which allow understanding the physical-chemical reactions that affects the waters.
- A statistical study, both for soils and waters, to evaluate the variables and cases homogeneity, as well as its relationships with the aim to find interesting correlations.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA ZONA

### 1.1.1. Antecedentes

En 1970, el Instituto Geológico y Minero de España publica la Guía Geológica, hidrogeológica y minera de la provincia de Madrid, acompañada de un plano, a escala 1:200.000, en el que se delimitan las distintas formaciones geológicas y se sitúan minas y canteras. Obra escrita por el doctor Ingeniero de Minas Juan Pérez Regodón. Posteriormente se han publicado numerosos estudios y trabajos de la Comunidad de Madrid, a algunos de los cuales se hace referencia en distintos apartados de esta Tesis.

La primera gran obra sobre geología madrileña aparece publicada en 1.864 bajo el título “Descripción física y geológica de la Provincia de Madrid”, escrita por Casiano de Prado. En 1.929 el Instituto Geológico y Minero de España publica “Memoria explicativa de la Hoja nº 559, Madrid”, obra de José Royo y Gómez y Laureano Menéndez Puget, punto de referencia para los estudiosos de los depósitos terciarios y cuaternarios de esta cuenca.

## 1 INTRODUCCIÓN

---

En el periodo Precámbrico-Cámbrico, la región de Madrid formaba parte de una cuenca en la cual se fueron depositando materiales finos que, por procesos diagenéticos, dieron lugar a rocas sedimentarias de grandes espesores.

Durante el Cámbrico, estos materiales son afectados por movimientos tectónicos prehercínicos que los pliegan suavemente y ocasionan oscilaciones del nivel del mar.

A partir del Carbonífero, empiezan las primeras manifestaciones de la Orogenia Hercínica, la cual producirá la retirada del mar, favoreciendo en sus últimas fases la intrusión de plutones que forman actualmente la Sierra, junto con neises y cornubianas.

Al final del Paleozoico, la erosión arrasa los relieves y origina una penillanura sobre la que se depositan los materiales del Mesozoico, inicialmente de origen continental (Patones), posteriormente marinos (Pontón de Oliva), para terminar con una sedimentación de conglomerados.

Ya en el Cretácico, el mar de Thetys (forma primigenia del actual mar Mediterráneo) inicia una transgresión marina hacia el NO, cubriendo parte de la llanura herciniana y quedando algunas pequeñas zonas emergidas. Los sedimentos calcáreos se fueron depositando en el fondo marino originando los estratos calizos, que más tarde emergerían como, por ejemplo, en la Sierra Norte los del Valle del Lozoya y el transecto geológico de Guadalix de la Sierra- El Vellón- Torrelaguna- Patones.

En el Cenozoico, una regresión marina alejó la línea de costa del centro del antiguo macizo herciniano, coincidiendo con la orogénesis alpina, consecuencia de la convergencia y colisión posterior de las placas tectónicas europea y africana. Este proceso geológico dió lugar al Sistema Central.

Durante el Mioceno, la erosión del relieve, junto a procesos de sedimentación, originan una nueva penillanura.

Ya en el Plioceno, se encaja la actual red fluvial que se irá desarrollando en el Cuaternario. En este período tuvo lugar la glaciación Würm, que provocó un modelado glaciar aún presente en algunos puntos de las cumbres de Guadarrama. En la zona Norte son perceptibles el Pico Nevero (2.209 m), Puerto de Lozoya, Pico Reajo Alto (2105 m) y áreas de influencia como La Nevera (1900 m) (Izco, 1984).

### 1.1.2. Introducción

El Sistema Central, la gran divisoria castellana, a lo largo de los 700 km que median entre la Cordillera Ibérica y el Atlántico, está estructurado en varias sierras bien definidas.

Aunque por altitud constituye región montañosa modesta, tiene un significado fisiográfico muy importante al actuar como regulador climático y ecológico entre ambas mesetas.

Esta incidencia es especialmente notoria en la línea de contacto entre montaña propiamente dicha y llanura, con variaciones térmicas, de humedad e insolación, por lo que se establecen barreras ecológicas y agronómicas, límites de usos, etc. (Pedraza, 1994). Los contrastes entre los ambientes serranos y los propiamente meseteños son relativamente intensos pero se reconoce una franja de transición definida por las llamadas rampas, especialmente en la zona meridional y oriental.



Mapa de Unidades estructurales de España (NDGC, 2006)

### 1.1.3. Morfoestructura y modelado

El Sistema Central es, sin duda, el modelo de relieve tectónico alpino más conocido y estudiado de toda la Península. De este a oeste, las Sierras de Somosierra, Guadarrama, Gredos, Béjar, Francia y Gata, en España y de Gardunha, Estrela y Lousá, en Portugal, son bloques montañosos elevados e individualizados por escarpes de falla muy nítidos y separados por estrechos corredores tectónicos. Todas esas sierras están predominantemente determinadas por múltiples accidentes de direcciones más o menos conjugadas, pero especialmente se señalan las

## INTRODUCCIÓN

---

NE-SO y NNE-SSO.

En Somosierra, la más oriental de todas las sierras anteriormente mencionadas y en su piedemonte inmediato es donde se ubica este trabajo de Tesis.

Somosierra constituye el borde oriental de ésta cadena montañosa y su articulación con la Cordillera Ibérica. Se trata de un macizo antiguo formado por pizarras, cuarcitas, areniscas, etc, sobreelevado casi 1000 m respecto a las planicies culminantes de la cuenca.

Está definido por una alineación montañosa principal NE-SO (Cebollera, 2.129 m; Pico del Lobo, 2.273 m; La Torrecilla, 1.669 m) y otras subsidiarias descendiendo en graderío (Robledal, 1.933 m; Loma Perdigones, 1.810 m). De esta forma, superficies de cumbres y piedemonte se articulan mediante una serie de rellanos intermedios originando una transición gradual entre las cimas y las planicies de la cuenca de Madrid, es decir, una configuración de conjunto en teclas. Como elementos menores del relieve pueden citarse las barras de cuarcita de dirección preferentemente submeridiana, las aristas de los interfluvios y las gargantas fluviales.

Tal como determinan las gargantas y los valles de los ríos Cañamares, Bornova, Jaramilla, Barbedillo, Jarama y La Puebla, el modelado más reciente ha sido originado por los procesos fluviales. La incidencia de otros procesos, tales como los glaciares, periglaciares y gravitacionales, carece de importancia fisionómica. Redes de ríos formando gargantas y valles perpendiculares a la alineación montañosa principal caracterizan toda la vertiente meridional de Somosierra y suelen tener una cierta regulación morfoestructural, por fracturación y por plegamiento. Los barrancos y gargantas de cabecera tienen depósitos aluviales, de muy escasos y reducidos a delgados recubrimientos de génesis aluvial-coluvial. En los valles, que se abren a la cuenca, aparecen las primeras terrazas, comúnmente a + 1-1,5 m y a + 4-5 m. A todos estos trazados fluviales, con sus gargantas y barrancos incluidos, se les supone herencia terciaria.

El modelado glaciar queda reducido a las cumbres de Somosierra, con circos incipientes y nichos de nivación, todos por encima de los 1900 m. Los fenómenos periglaciares, que tampoco generan modificaciones destacadas, permanecen activos a cotas superiores a los 1500-1700 m.

Las vertientes de estas sierras presentan perfiles suavizados carentes de recubrimientos importantes, con la cubierta edáfica frecuentemente erosionada como consecuencia de la deforestación.

Los procesos de coluvionamiento están asociados a los de escorrentía, por lo que se localizan en lugares preferentes: taludes muy activos y conos o abanicos de piedemonte, vaguadas, cuencas de recepción torrencial, etc.



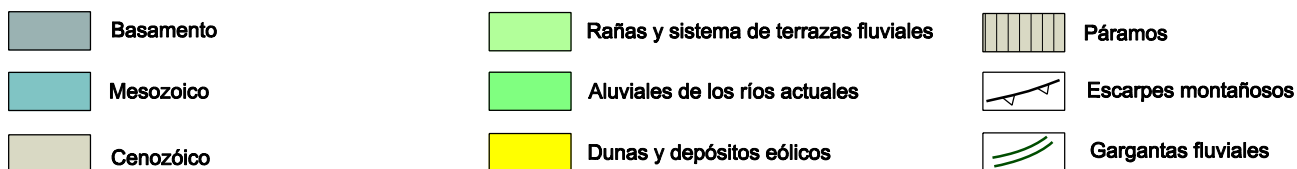
Los materiales mesozoicos adosados a la sierra dan lugar a una cuesta estructural orientada NE-SO (Torrelaguna-Patones –Valdepeñas de la Sierra) y con una inclinación a veces superior a los 30°. Depresiones periféricas se desarrollan sobre el sustrato de la cuesta, el macizo varisco y los torrentes inciden perpendicularmente en ella, dando lugar a pasos cortos y angostos.

El piedemonte de Somosierra forma parte de la denominada cuenca de Madrid, su borde noroeste y sobre ella se sustenta. Presenta una orografía llena de contrastes, relativamente accidentada y bien estructurada. Todo él se organiza en distintos planos aluviales, encajados unos sobre otros, algunas decenas de metros desde la referencia más alta del relleno sedimentario (La Mierla, 1154-1064 m). Constituyen extensas zonas llanas y elevadas, las denominadas rañas, formadas por alargadas plataformas aluviales de escasa pendiente y geometría digitada, que representan antiguos sistemas de abanicos aluviales coalescentes. Estos abanicos, altamente diseccionados por la red de drenaje actual, constituyen superficies divisorias entre Jarama, Sorbe y Henares. Están colgados sobre esos ríos a una altitud (de 1030 a 822m) y desnivel considerable (200-220m), todos ellos algunos metros superiores a los de las terrazas más altas.

El valle del río Jarama, cerca de Retiendas, a su entrada al dominio geológico denominado cuenca de Madrid tiene una cota de 890 m. Desde allí se ajusta al borde serrano, determinado por la cuesta de Torrelaguna, hasta que concurre con el río Lozoya (700 m en la base del embalse del Pontón de la Oliva), y desde ese punto hasta su confluencia con el Henares, desciende más de 300 m (556 m en esa confluencia). En ese trayecto presenta no menos de 17 niveles de terrazas fluviales, en disposición escalonada, preferentemente en una de sus márgenes lo que determina su carácter asimétrico. Los niveles entre +195 y +144 m forman el primer conjunto de terrazas altas y se desarrollan exclusivamente en el entorno de las plataformas de la Raña definidas en dicho interfluvio. Los niveles entre +124 y +70 m constituyen el segundo conjunto de terrazas altas cuya extensión se prolonga hacia el centro de cuenca colgadas sobre los escarpes en yesos de los valles principales. Ya muy bien enmarcados en los cursos fluviales actuales, aparecen escalones situados entre +68 y +30 m, las llamados terrazas medias.

Por último, los niveles entre +25 y +5-6 m definen el grupo de terrazas bajas, denominadas “Terrazas de Campiña”, más al sur, en el entorno de los valles del Henares y Tajo (Pérez González, 1994).

Se adjunta Mapa morfoestructural de la zona de estudio.



### 1.1.4. Litología y estructura

El estudio, en el borde nororiental de la Comunidad Autónoma de Madrid, está circunscrito al curso de una de sus principales arterias fluviales: el río Jarama. Abarca, por tanto, los dos grandes dominios geológicos regionales constituyentes de este territorio, el Sistema Central y la cuenca meso-cenozoica del Tajo o de Madrid.

El Sistema Central está constituido por rocas predominantemente variscas (hercínicas). En su borde oriental, Somosierra, tradicionalmente se han diferenciado tres dominios en virtud de las características litológicas, estructurales e intensidad de metamorfismo (Bellido et al., 1981): oriental, central y occidental. El territorio implicado en este trabajo se ubica fundamentalmente en el primero de ellos. Dicho dominio, situado al este de la falla de La Berzosa-Riaza, se caracteriza por el predominio de los materiales ordovícicos afectados por metamorfismo de bajo grado, por la aparición de rocas de edad pérmica y por la ausencia total de manifestaciones plutónicas granitoides tardivariscas.

Desde el punto de vista litoestratigráfico destaca la presencia de una formación detrítica de edad ordovícica, discordante y transgresiva sobre la formación Ollo de Sapo (aflorante en Hiendelaencina, Cardoso y Riaza) o bien sobre otras unidades de micaesquistos y gneises pelíticos con anfibolitas y calizas; todas precámbricas o infracámbricas. Desde el punto de vista estructural sobresale la disposición meridiana de un plegamiento vergente al este.

Son rocas metamórficas e ígneas, las primeras de índole casi exclusivamente siliciclástica constituida por esquistos (micaesquistos), pizarras y cuarcitas y otras incorporaciones de menor entidad como anfibolitas y silicatos cálcicos; las segundas fundamentalmente por granitoides y distintos tipos de neises.

Los materiales plutónicos y metamórficos del Sistema Central están flanqueados al sur por unidades geológicas meso-terciarias. El mesozoico aflorante en una estrecha franja orientada SO-NE, delimitando la sierra propiamente dicha, tiene características semejantes a las de la cadena Ibérica. Aquí aparece un registro cretácico detrítico/carbonatado constituido por dos formaciones fundamentales: formación Patones (equivalente a la facies Utrillas) y la formación Pontón de la Oliva de naturaleza calco-dolomítica, pero margosa en su parte basal.

El registro geológico cenozoico es producto de la erosión del dominio anterior, como consecuencia de su elevación topográfica al adquirir su condición montañosa. Todo él, desde el Paleógeno que aflora como el mesozoico, también inclinado y adosado al macizo antiguo, rellena la

## 1 INTRODUCCIÓN

---

denominada cuenca de Madrid. Son, sin embargo, los sedimentos de edad neógena los que constituyen su relleno principal y los que afloran en este piedemonte meridional de Somosierra.

Se trata de unos materiales terrígenos con estratificación subhorizontal o ligeramente inclinada hacia el sur. Son arenas de carácter arcósico, conglomerados, areniscas y detríticos más finos (limos). La aparición de rocas carbonatadas y yesíferas es muy frecuente, pero ya a latitudes más meridionales.

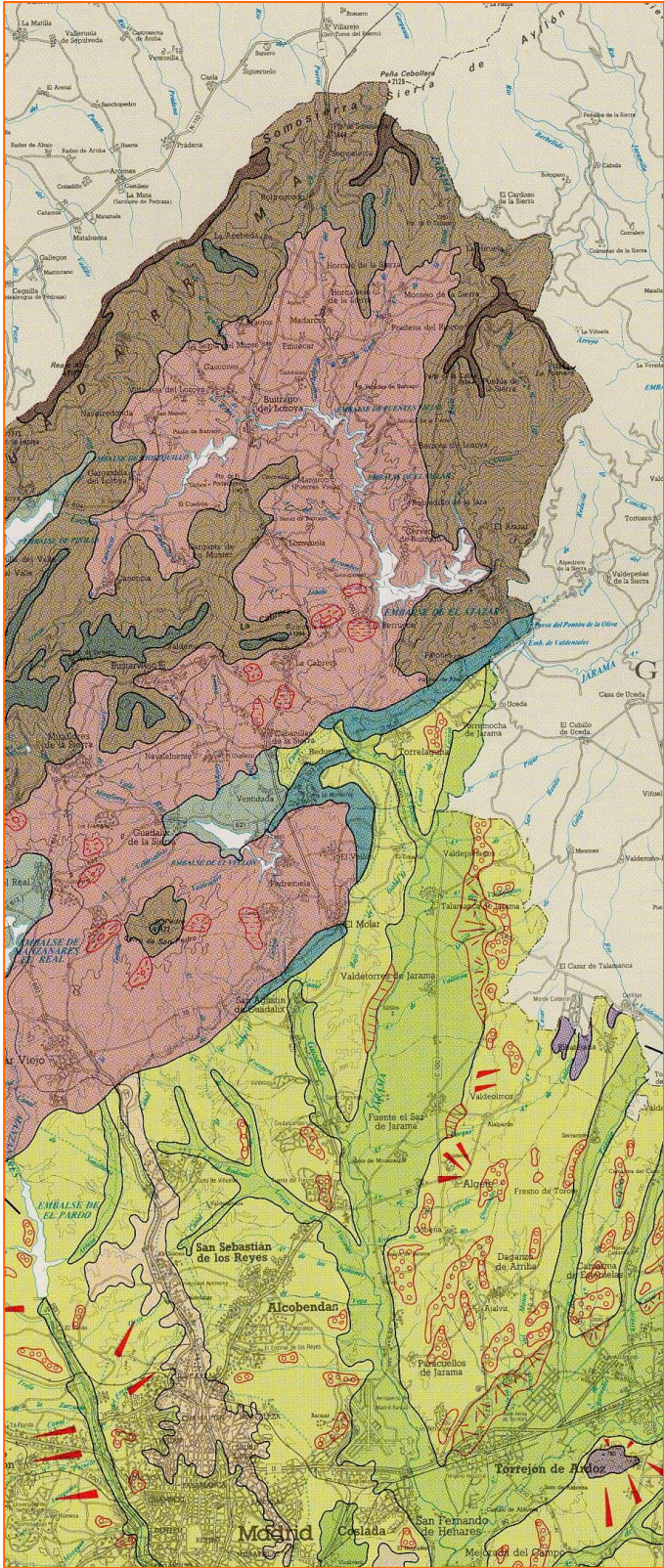
También de edad cenozoica son los sedimentos mas recientes, los ligados a la actividad de la red fluvial actual, desde su origen primero, probablemente al final del neógeno. Se trata de las rañas, las terrazas fluviales y los aluviones de los ríos, y de otros depósitos menores. Las rañas que en algunos lugares pueden alcanzar potencias de hasta 10m, se sitúan discordantemente (de forma erosiva y/o angular) sobre los depósitos arcósicos cenozóicos y calcáreos mesozoicos de borde de Cuenca. En este sector de la cuenca de Madrid, se ha considerado como raña el techo del piedemonte sur de Somosierra, una plataforma digitada y escalonada en varias superficies, constituidas por una litoestratigrafía similar, es decir, gravas de cuarcita y pizarra, generalmente alteradas y arenas. Dicho piedemonte, drenado por el río Torote y actualmente la divisoria de los interfluvios de los ríos Jarama, Sorbe y Henares, representa, ya claramente, los primeros niveles de disección fluvial en la cuenca, aunque están bien diferenciados de las terrazas de tales ríos (Pérez González y Gallardo, 1987). Las terrazas que representan las distintas y sucesivas agrupaciones de sedimentos fluviales son muy numerosas, pero su composición litológica es idéntica: gravas polimícticas, generalmente cuarcíticas, arenas y limos arcillosos con ocasionales cementaciones ferruginosas y carbonatadas.

Se adjunta la zona de estudio, correspondiente al Mapa de Unidades Fisiográficas de la Comunidad de Madrid (Escala 1:500.000).



1.1 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA ZONA

DOMINIOS		UNIDADES	ELEMENTOS	
La Sierra	Cimas	Cuerdas		
		Parameras serranas		
	Vertientes	Laderas	Circos y morrenas glaciares	
		Rampas	*	
	Depresiones	Valles interiores	Navas	
La Depresión	Altas superficies	Páramos		
		Raías		
		Divisorias		
	Relieves intermedios	Plataformas estructurales		
		Cuestas estructurales		
		Cerros		
	Depresiones	Fondos endorreicos		
	Valles	Vegas	Conos aluviales	
		Vertientes	Depósitos de pie de talud	
			Terrazas	
Glacis				
ESCALA 1:500.000				
* Cerros y/o relieves residuales tipo inselberg				



Mapa de Unidades Fisiográficas de la Comunidad de Madrid (Escala 1:500.000)

### 1.1.5. Principales características del sustrato geológico del muestreo\*

(\*) Los datos se han recopilado a partir de la información geológica aportada por el Mapa Geológico Nacional, a escala 1:50.000, referente a las hojas citadas en bibliografía (Hojas núm. 459, 484, 485, 509, 510, 534, 535).

#### a) Dominio de la Sierra

##### ○ Granitos tipo Colmenar Viejo

Presentan el aspecto común al de la mayoría de los demás granitoides de la Sierra de Guadarrama, con color gris, tamaño de grano grueso, carácter porfídico y gran homogeneidad general. Su composición dominante es granítica con tendencia cuarzo-monzonítica y adamellítica. Sus constituyentes principales son cuarzo, feldespato potásico (cristales de 3 a 5 cm), plagioclasa, biotita y, frecuentemente, cordierita.

Al microscopio se presentan como rocas holocristalinas hepidiomorfas, inequigranulares y con tamaño de grano medio a grueso. Como minerales accesorios, aparece cordierita, apatito y opacos. Es muy frecuente la transformación de cordierita a sericita, pinnita o clorita y alteraciones parciales de plagioclasa a sericita y de biotita a clorita; es frecuente la aparición de moscovita secundaria. Ocasionalmente, hay microenclaves metasedimentarios constituidos por biotita y cuarzo.

##### ○ Ortoneises glandulares:

Constituye una unidad característica y con amplia representación en el Sistema Central, especialmente en Guadarrama. Su principal rasgo distintivo es su carácter glandular, pues presenta megacristales de feldespato potásico de hasta 10 cm y glándulas de plagioclasa y cuarzo inferiores a 2 cm. La matriz es cuarzo-feldespática con mucha biotita.

Son marcadamente ácidos, con contenido en sílice superiores al 70% y relaciones ortosa/albita muy variables; poseen carácter peraluminico con corindón (superior al 1%).

##### ○ Miembro de alternancias de cuarcitas y pizarras de la formación rodada:

Esta unidad cartográfica se atribuye al Ordovícico inferior y medio y alcanza alrededor de 100 m de espesor.

Al microscopio, los niveles de cuarcitas y de pizarras tienen una composición semejante a la formación Alto Rey, es decir, cuarzo y en proporciones variables y pequeñas, mica blanca. En la pizarra, además de los anteriores, clorita y biotita. Los accesorios más frecuentes son circón,

## 1.1 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA ZONA

---

apatito, turmalina, opacos y óxidos de hierro.

- Miembro de pizarras negras homogéneas de la formación rodada:

Presenta una gran extensión cartográfica y un espesor cercano a los 1.000 m, con pizarras negras lustrosas y con grafito, pirita y sulfuros diseminados.

Al microscopio, su composición es cuarzo, sericita, clorita, cloritoide y, más raramente, biotita. Los accesorios más frecuentes son circón, turmalina, óxidos de hierro y opacos.

- Micaesquistos con metasamitas, amfibolitas y silicatos cálcicos:

Esta unidad geológica consiste esencialmente en micaesquistos y esquistos que alternan con abundantes niveles de metasamitas y cuarcitas de orden métrico y decimétrico. Ocupan una banda de dirección N-S y unos 4 km de ancho, y se les asigna una edad de forma estimativa precámbrica-cámbrica.

Su aspecto general es foliado, individualizándose niveles lenticulares ricos en cuarzo y plagioclasa, pudiéndose reconocer megacristales de granate estaurolita, sillimanita y distena.

La asociación mineralógica principal es cuarzo, biotita, clorita, cloritoide, moscovita, granate, olivino sillimanita, andalucita, epidota y albita; su abundancia modal en detalle suele ser muy variable. Los accesorios más comunes son circón, turmalina, apatito, esfena, ilmenita rutilo, magnetita grafito y pirita.

- Esquistos, metasamitas y cuarcitas:

Se trata de un conjunto litoestratigráfico formado por esquistos y cuarcitas con niveles de cuarcitas anfibólicas, aunque en su parte superior suelen ser cuarcitas, esquistos y pizarras.

Resulta una alternancia de tramos eminentemente cuarcíticos y tramos predominantemente esquistosos.

Presenta asociaciones mineralógicas principales y accesorias similares a las descritas para la unidad anterior.

- Esquistos y pizarras con cuarcitas. Formación constante:

Se trata de pizarras, filitas, esquistos y cuarcitas, en una unidad cartográfica atribuida al Ordovícico inferior. Tienen texturas y composición mineralógica muy variable, sobre todo, en función del metamorfismo que le afecte que aumenta hacia el oeste. Se aprecia estratificación original y esquistosidad y crenulación muy marcada.

Mineralógicamente, el grafito, el cuarzo (venas de segregación) y cloritoide pueden llegar a ser muy abundantes y la biotita también, en zonas con metamorfismo importante. La moscovita es mayoritaria en las porciones más pelíticas, pero también el granate. En niveles de roca de silicatos cálcicos la asociación mineral dominante es cuarzo, hornblenda, plagioclasa, biotita y granate, la de accesorios apatito, circón, esfena y opacos, y la de secundarios, clorita, prehnita, clinozoisita y sericita.

### b) Borde de la Sierra

#### o Formación carbonatada cretácica

El registro geológico cretácico, de naturaleza fundamentalmente carbonatada, da lugar a un importante resalte morfológico regional: la cuesta de Torrelaguna. Dicho resalte, constituido por dolomías, calizas dolomíticas y calizas, tiene un espesor de 30 a 45 m y carácter azoico, aunque se atribuye al Santoniense (Cretácico superior). En detalle se trata de calcarenitas oolíticas y bioclásticas, biomicritas, calizas laminadas de algas y dolomías distribuidas en tres secuencias: margas y micritas a calcarenitas; calcarenitas y calizas con estructura fenestral y algas cianofíceas, brechificadas; y calizas micríticas y calizas con porosidad fenestral y costra ferruginosa terminal.

### c) Dominio de la Cuenca

#### o Arcosas

El sustrato terciario del valle del Jarama, que se atribuye al Mioceno superior- Plioceno inferior, tiene un espesor de unos 150 m. Está constituido por arenas y fangos arcósicos anaranjados con intercalaciones de cantos.

Petrológicamente, se trata de arenas y areniscas de grano anguloso grueso, de cuarzo (30 a 45%), feldespato potásico (20 a 30%), plagioclasas muy alteradas (0 a 5%) y fragmentos de rocas (5 a 20%), generalmente metamórficas (esquistos, granitos y neises).

Los minerales pesados más frecuentes son estaurolita, silimanita, cianita, andalucita y turmalina. Asimismo, presentan una importante matriz arcillosa de carácter micáceo, procedente de la diagénesis de feldespatos, micas, fragmentos lábiles, etc.



### ○ Terrazas del Jarama

Aluvión de terraza de campiña del río Jarama situado a unos 12 m sobre el nivel de su cauce actual y atribuido a una edad comprendida entre el Pleistoceno medio y la actualidad. La forman gravas y cantos poligénicos; arenas y limos arcillosos con 6 o 7 m de espesor. Dichas gravas son de naturaleza polimíctica, con cuarcitas y cuarzos mayoritarios y tamaño de grano por debajo de los 12 cm de diámetro. Las arenas presentan texturas gruesas a muy gruesas o medias a gruesas, pobre o moderadamente clasificadas y con altos porcentajes de limo-arcilla (superiores al 40%).

Desde el punto de vista mineralógico, la asociación es estaurolita (22-46%), granate (10-45%), sillimanita (7-23%), turmalina (7-15%) y, en minerales ligeros, el cuarzo es dominante (52-69%) sobre el feldespato (23-36%) y la mica (0-10%).

### ○ Terraza baja del Jarama

Como la mayoría de las terrazas de este río, los elementos mayoritarios son gravas de cuarcita, cuarzos y pizarras, por orden de importancia; en este caso también aparecen granitoides procedentes del río Lozoya. Las pizarras aumentan porcentualmente su importancia en los tamaños menores, siendo ocasionalmente mayoritarias. El tamaño está en el 80%, por debajo de los 14 cm, con centilos tamaño bloque. Las arenas, muy poco abundantes en la matriz, son gruesas a muy gruesas o medias a gruesas, pobre o moderadamente clasificadas, con finos por debajo del 6-7%.

En la parte superior suele conservarse arena fina, moderadamente clasificada con altos porcentajes de limo-arcilla (superiores al 40%). Mineralógicamente domina la estaurolita (20-49%) acompañada por la turmalina (1-49%), el granate (0-38%) y la sillimanita (0-28%) en los pesados, mientras que en los ligeros es el cuarzo (52-98%) sobre el feldespato (1-21%) y la mica (1-44%).

### ○ Fondos de valles principales y secundarios

Son depósitos ligados a la actividad actual de los cursos fluviales y arroyos. En el Jarama, la zona de inundación cultivable está constituida por hasta 2 m de arena fina a muy fina (hasta el 60% de limo y arcilla) cubriendo barras de gravas. Las arenas suelen tener textura de arena media a gruesa, moderadamente bien clasificada y con fracción limo-arcilla por debajo del 6%.

## 1 INTRODUCCIÓN

---

Mineralógicamente, la asociación de pesados es de estaurolita (30%), biotita (22), turmalina (14%) y granate (12%), y la de ligeros cuarzo (69%), mica (19%) y feldespato (13%).

Desde luego, la textura y composición de los aluviones secundarios difiere de la anterior, en cuanto a granulometría, arenas con peor clasificación y, en cuanto a mineralogía, muy condicionada por el entorno local.

### 1.2. CLIMATOLOGÍA

#### 1.2.1. Introducción

El clima juega un papel fundamental en los procesos de formación/alteración de la roca y minerales, en la evolución de la materia orgánica y en las migraciones: desplazamientos de elementos solubles o coloidales por influencia de corrientes de agua.

El clima va a influir en la alteración de minerales en el suelo, en la precipitación de metales procedentes del aire y en la movilización de metales en el perfil del suelo, en los ríos y lagos.

Las variaciones estacionales van a influir en la tolerancia de las plantas; por ejemplo, cuando las temperaturas son elevadas aumenta la velocidad de transpiración y captación, así como en el envejecimiento estacional de los tejidos.

En cuanto a la alteración, como regla general, se considera que una presencia elevada de productos orgánicos solubles y una elevada acidez van a incrementar la alteración. Se retrasa la formación de arcillas e incluso se degradan las ya existentes. Por otro lado, una elevada concentración de cationes alcalinotérreos y una elevada actividad biológica disminuye la alteración y favorece la formación y conservación de arcillas, más ricas en SiO<sub>2</sub>.

En un clima templado, la hidrólisis ácida provoca una pérdida de cationes básicos, de Al y de Fe. La neoformación de arcillas es escasa, sobre todo en suelos ácidos y bien drenados, predominando las arcillas heredadas o transformadas.

En un clima cálido y húmedo, la hidrólisis neutra o débilmente alcalina produce una alteración más rápida y completa. La sílice y las bases son arrastradas, mientras que los hidróxidos de Fe y Al tienden a acumularse. Predomina la neoformación sobre la transformación.

Cuando el clima presenta estaciones contrastadas, por ejemplo el clima continental, la alteración presenta caracteres intermedios entre estos dos extremos.

Las migraciones o lavado de bases y arcillas están regidas, principalmente, por el factor de drenaje tanto edáfico como climático, que corresponde a la diferencia entre pluviometría y evapotranspiración (EVT). El drenaje mensual da una idea de la importancia de los procesos de lavado ligados al clima. El drenaje anual corresponde a la suma de drenajes mensuales menos 100 mm, para los meses de balance positivo ( $pp > EVT$ ). El *clima continental* es desfavorable a todo lavado, ya que al ser lluvias estivales, sólo se produce un drenaje limitado. El clima *mediterráneo húmedo* es más favorable al lavado, ya que las lluvias exclusivamente invernales dan lugar a un drenaje importante. La *aridez* del clima condiciona los procesos de lavado y arrastre de distintos elementos en función de la movilidad. En *climas muy secos*, con drenaje climático nulo, no existen migraciones. En estepas áridas cuyos suelos permanecen carbonatados incluso en superficie. En *climas semiáridos o subhúmedos*, el lavado de calizas origina un horizonte cálcico siempre que el drenaje climático anual sea menor de 150 mm. Si es mayor no se acumula calcio en profundidad, aumenta el lavado de coloides al mismo tiempo que la humedad climática aumenta, dando lugar a un horizonte B enriquecido en coloides.

### 1.2.2. Datos climáticos de la zona:

La zona de estudio se encuentra incluida dentro del macrobioclima mediterráneo continental. El clima mediterráneo es un clima extratropical que, independientemente de su temperatura media anual, presenta un periodo de sequía de al menos dos meses de duración ( $P < 2T$ ,  $Im > 2,5$ ; donde  $P$ = precipitación media anual en milímetros y  $T$ = temperatura media anual) y con una época de lluvias entre el otoño y la primavera. Este periodo debe cubrir, al menos, 3 meses consecutivos en los que el  $Im < 2$  ( $Im = ETP$ ), donde  $ETP$ = Evapotranspiración mensual potencial e  $Im$ = Índice de mediterraneidad. El Índice de mediterraneidad ( $Im$ ) es el cociente entre el valor de la evapotranspiración media estival de Thornthwaite ( $PEs$ ) y la precipitación en mm del mismo período ( $Ps$ ). En territorios extratropicales se consideran como meses estivales junio, julio y agosto, en el hemisferio norte, y diciembre, enero y febrero, en el hemisferio sur.

El término de evapotranspiración expresa los efectos combinados de la evaporación del suelo y de la transpiración de las plantas. Se define como la cantidad de agua que perderá una superficie de suelo completamente cubierta de vegetación en crecimiento activo si, en todo momento, existe en el suelo humedad suficiente para su uso máximo por las plantas.

## 1 INTRODUCCIÓN

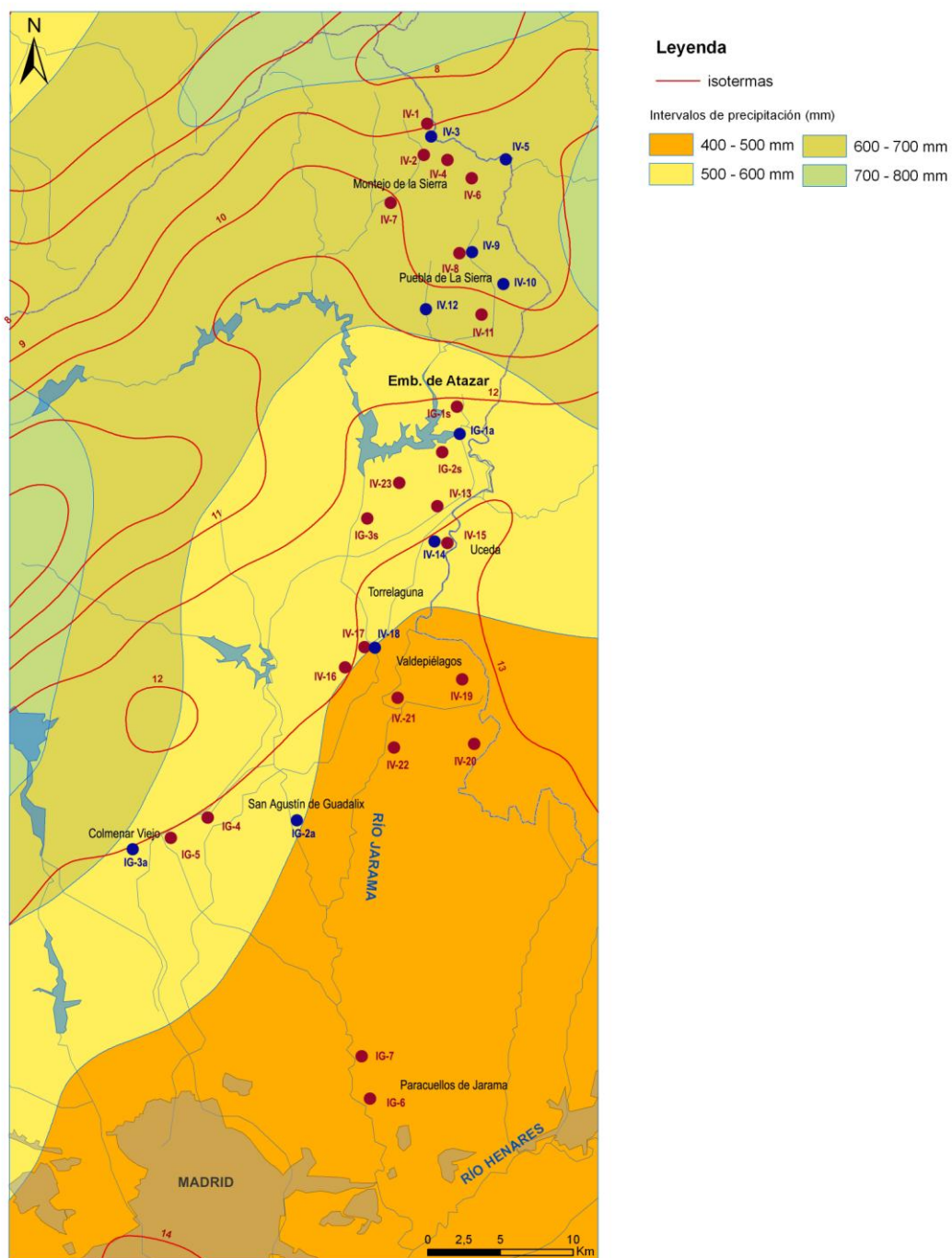
---

De los seis pisos bioclimáticos mediterráneos, encontramos cuatro en el sector guadarrámico (Rivas Martínez et al., 1990):

- Mesomediterráneo (800-1200 m)
- Supramediterráneo (1200-1600 m)
- Oromediterráneo (1600-2300 m)
- Criomediterráneo (2000-)

En la vertiente meridional, los valles centrales presentan ombrotipos secos en el piso mesomediterráneo y subhúmedos en el supramediterráneo. En la vertiente septentrional, algo más seca en el piso supramediterráneo inferior, existe también un incremento de la precipitación hacia las sierras de Somosierra y Ayllón, con ombrotipos húmedos, al igual que en la cabecera de algunos valles occidentales orientados al norte (Pauar); mientras que hacia el oeste disminuyen las precipitaciones, debido al efecto sombra de las sierras gredenses y paramero- serrotenses (Rivas-Martínez et al., 1990).

La Figura 1.4 muestra el mapa climático de la zona de estudio. Para la elaboración de este esquema se contó con dos fuentes de información: por una lado, archivos raster de temperatura y precipitación media anual del Atlas Climático Digital de la Península Ibérica, elaborado por la Universidad Autónoma de Barcelona; y por otro lado, las mismas variables climáticas elaboradas por el Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA) del MAPA, a partir de los datos de período 1961-1996 de los observatorios del Instituto Nacional de Meteorología. El esquema climático se conforma de isolíneas de precipitación y temperatura, isoyetas e isotermas, junto con un mapa de coropletas que muestra los intervalos de precipitación cada 100 mm.



### 1.3. VEGETACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La vegetación supone una gran protección para el suelo y en cuanto desaparece aumentan los procesos de erosión. Para que la estructura del suelo sea estable debe estar formado por materia orgánica, materia mineral y agregados (ácidos, grupos OH y compuestos metálicos). La estructura del suelo puede perderse por falta de algún componente: si existe poca materia orgánica se forman pocos agregados y la estructura será arenosa o arcillosa masiva pero no será estable. La materia orgánica da lugar a la formación de horizontes superiores del suelo, da color al suelo, aumenta la acidez del suelo y temperatura, proporciona estructura al suelo y una elevada capacidad de intercambio catiónico.

La vegetación va a influir sobre la evolución del suelo en los siguientes aspectos:

- Favorece la formación de microclimas.
- En función de la profundidad del enraizamiento:
  - Si es profundo: se favorece al máximo las corrientes de agua descendente, es decir, se favorece el lavado de elementos coloidales
  - Si es superficial: la absorción de agua detiene el arrastre, formándose un horizonte B de menor profundidad y siendo la incorporación de la materia orgánica mayor.
  - Producción de humus: fundamental en la edafogénesis por la naturaleza de los restos, microflora y microfauna que favorece.
  - Protección más o menos eficaz frente a la erosión.

La mayoría de las asociaciones vegetales viven en un circuito cerrado que afecta a la economía del agua y de las migraciones coloidales, manteniéndose un equilibrio constante en la composición y propiedades del horizonte A y B, es decir, condiciona la permanencia y estabilidad del perfil.

La Sierra Norte de Madrid está bajo la influencia dominante de lo que se conoce como Provincia Carpetano-ibérico-leonesa y, en menor medida, por la Provincia Castellano-maestrazgo-manchega, que se extiende por áreas surorientales.

En la primera categoría se diferencian tres divisiones menores: Paularense, Somosierrense y Guadarramense. El sector Paularense abarca todo el Valle del Lozoya y la mayoría de los Montes Carpetanos. El sector Somosierrense ocuparía la parte más oriental de la Comarca, donde se ha realizado la mayor parte del estudio y comprende desde la Acebeda- Robregordo hasta las Sierras del Rincón (limitando con Guadalajara).

El último sector, Guadarramense, se extiende por Cuerda Larga, los altos de la Morcuera, sierras norte y sur de Bustarviejo y los berrocales de la Cabrera.

En la Comunidad de Madrid se diferencian cuatro pisos: mesomediterráneo (900-1000 m), supramediterráneo (1650-1750 m), oromediterráneo (2000-2150 m) y crioromediterráneo (>2000-2150 m). La zona de estudio se encuentra localizada en los dos primeros pisos siendo la vegetación potencial en el piso mesomediterráneo, sobre substrato básico, el encinar manchego (*Quercus rotundifolia*) (por ejemplo, junto al embalse de El Atazar) y en cotas más elevadas el quejigal (*Quercus faginea*). Sobre suelo ácido, la vegetación potencial es también el encinar y el matorral corresponde a jarales (El Atazar), etapa de la degradación de encinares, quejigales y, en menor, medida melojares. Debido a la notable influencia antrópica, la actual vegetación de encinares alberga enebros (*Juniperus oxycedrus*) y pino carrasco (*Pinus halepensis*). Como formaciones arbustivas destacan las esplegueras y aulagares de El Pontón de la Oliva y Torrelaguna respectivamente, ambos matorrales mesetarios de suelos calizos. Son frecuentes el romero (*Rosmarinus officinalis*), el cantueso (*Lavandula pedunculata*) y el tomillo blanco (*Thymus mastichina*). Otra importante formación boscosa del piso mesomediterráneo son las saucedas meseteñas (Izco, 1984) que crecen sobre ramblas y junto a ellas medran choperas que alternan con olmos.

La vegetación potencial del piso supramediterráneo sigue dominada por los encinares en cotas inferiores y, por encima, de ellos el robledal melojo (melojar) (*Quercus pyrenaica*). En el extremo oriental y zona de estudio se encuentran los melojares ibéricos (por ejemplo, Puebla de la Sierra y La Hiruela). En cotas superiores del robledal se une el pino albar (*Pinus sylvestris*), pino negral (*Pinus pinaster*), hayas (*Fagus sylvatica*) en Montejo de la Sierra y aislados en La Hiruela. El hayedo de Montejo de la Sierra se localiza en el Monte de El Chaparral y se caracteriza por uno de los hayedos más meridionales del mundo y además estar orientado al sur.

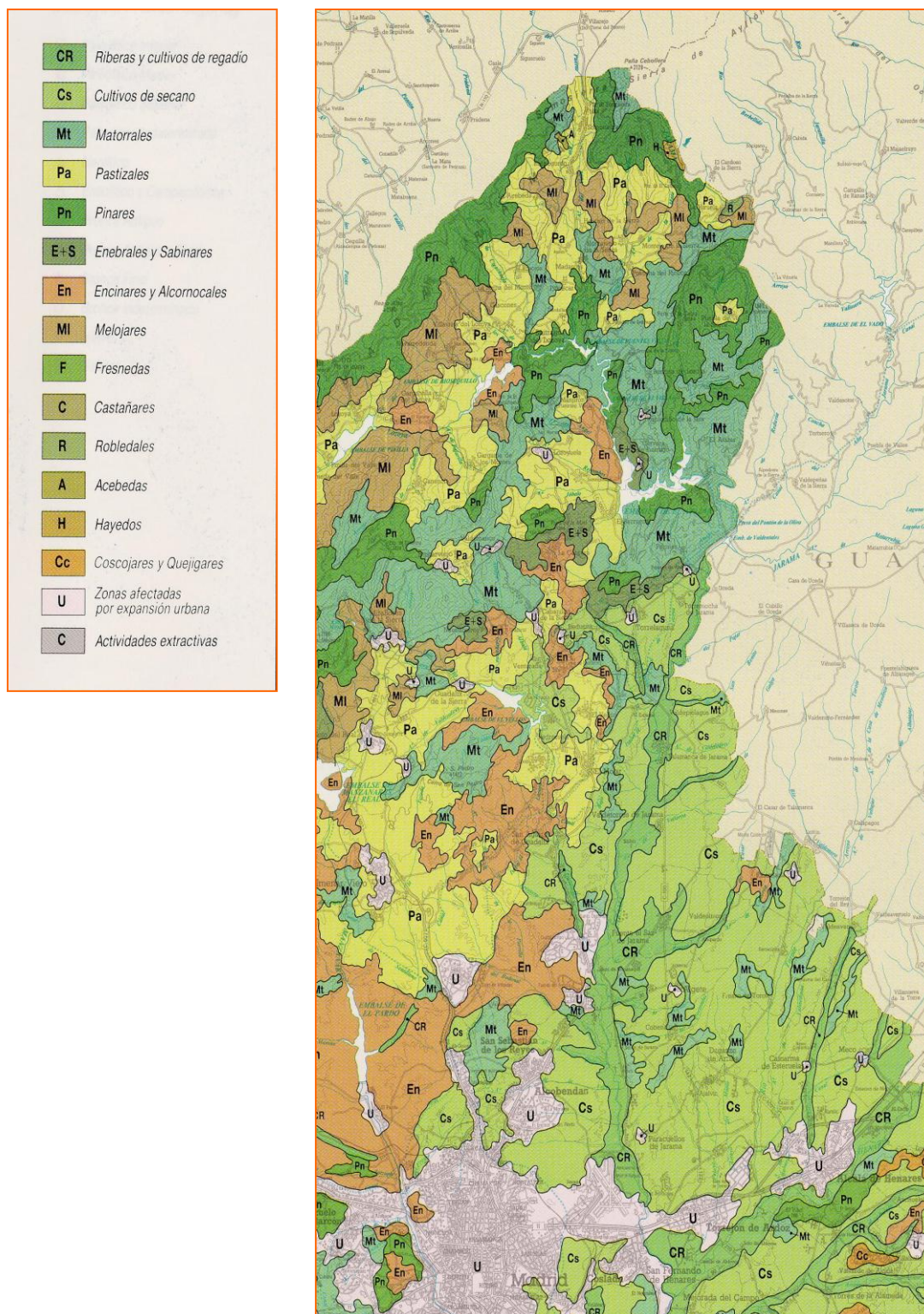
Por otro lado, los cursos de agua van a sectorizar las laderas de la Sierra, creciendo en torno a ellos una vegetación riparia muy típica, como son las saucedas montañosas.

Las fresnedas (*Fraxinus angustifolia*) ocupan importantes espacios en la Sierra Norte de Madrid (Valle del Lozoya, proximidades de Patones). Forman bosques caducifolios de carácter eurosiberiano, en estrecha relación con el melojo. Las olmedas (*Ulmus minor*) son bosques caducifolios de sotos y riberas de municipios como Torrelaguna y Patones.



## 1 INTRODUCCIÓN

La cartografía adjunta muestra el mapa de vegetación de la zona de estudio (escala 1:400.000).





### 1.4. ASOCIACIONES DE SUELO DE LA ZONA DE ESTUDIO

A partir del Mapa de Asociaciones de Suelos de la Comunidad de Madrid, a escala 1:200.000 (CSIC, 1990), se han localizado y clasificado los suelos correspondientes a la zona de estudio como:

#### 1.4.1. Cambisoles (CM)

Grupo de suelos que forman mayor número de asociaciones y que más veces, como suelos asociados, aparecen también en otras asociaciones. Se desarrolla sobre todo tipo de material geológico, pero sobre todo a partir de rocas ácidas como granitos, gneises, esquistos, pizarras, micacitas y cuarcitas, por lo que se localizan fundamentalmente en la región norte y occidental de la Comunidad.

La característica fundamental de estos suelos es la presencia de un horizonte B cámbico formado por la alteración “in situ” de los minerales de las rocas, lo que da lugar a un color pardo vivo, una estructura típica, una liberación de óxidos de hierro y presencia de minerales alterables.

En la zona de muestreo se distinguen los siguientes tipos:

- Cambisol dístico (CMd) tiene un horizonte A ócrico y un grado de saturación < 50%. Se desarrollan fundamentalmente sobre materiales ígneos y metamórficos de naturaleza más o menos ácida como pizarras, esquistos, neises y granitos. Son suelos ácidos, sin carbonatos, de muy baja salinidad y moderados contenidos en materia orgánica, usualmente bien humificada. La textura suele ser arenosa o franco-arenosa y con alto grado de pedregosidad. Son muy permeables pero son los que menos retienen agua de todos los cambisoles.
- Cambisol húmico (CMu) posee un horizonte A de tipo úmbrico. Si tiene un horizonte A móllico, estará situado encima de un horizonte B cámbico con un grado de saturación < 50%. Son suelos ricos en materia orgánica pero mal humificada, ácidos, sin carbonato cálcico, y saturación en bases entre 30-40%, de textura media. Suelen ser también algo pedregosos dentro del perfil y con muy buena permeabilidad.
- Cambisol gleico (CMg) presenta hidromorfía o capa freática entre os 50 y 100 cm de profundidad.

### 1.4.2. Leptosoles (LP)

Suelos limitados en profundidad por una roca dura continua o por material muy calcáreo ( $\text{CO}_3\text{Ca}$  equivalente  $> 40\%$ ), o por una capa continua cementada dentro de una profundidad de 30 cm a partir de la superficie, o que tienen menos del 20% de tierra fina hasta una profundidad de 75 cm; sin otros horizontes de diagnóstico más que un horizonte A móllico, úmbrico u ócrico, con o sin un horizonte B cámbico (F.A.O., 1970). Se desarrollan sobre una gran variedad de materiales geológicos y litologías distintas como: calizas, neises y granitos, yesos y coluvios, etc.

En la zona de muestreo se distinguen los siguientes tipos:

- Leptosol lítico (LPq), está limitado a una profundidad máxima de 10 cm por una roca dura o capa cementada continua. Se observan en zonas erosionadas del norte de la Comunidad sobre granitos y neises y en el sur sobre calizas y yesos. Se corresponden con los antiguos Litosoles de la F.A.O. y se encuentran a una profundidad máxima de 10 cm, limitados por una roca dura o capa cementada continua.
- Leptosol úmbrico (LPu): tienen un horizonte rico en materia orgánica y color oscuro pero baja saturación en bases ( $< 50\%$ ). La roca aparece a más de 10 cm de profundidad.
- Leptosol dístrico (LPd): tienen en superficie un horizonte A ócrico pero en los que el grado de saturación es menor al 50%, al menos en alguna parte del suelo y carecen de roca dentro de los 10 primeros centímetros.
- Leptosol rendsinico (LPk) presenta un horizonte A rico en MO ( $x = 5,6$ ), de color oscuro y muy bien estructurada. Están situados sobre cualquier material calcáreo que tenga un porcentaje en carbonato cálcico equivalente  $> 40\%$ . Se encuentran sobre todo sobre calizas de todo tipo. Relación C/N próxima a 10 y pH cercano a 8.
- Leptosol móllico (LPm) presenta un horizonte A rico en MO ( $x = 3,6$ ) pero no poseen un porcentaje de carbonato cálcico  $> 40\%$  ni están situados sobre material calizo. Relación C/N próxima a 10 y pH cercano a 8.

### 1.4.3. Regosoles (RG)

Son suelos muy poco evolucionados con un horizonte A superficial de tipo ócrico o úmbrico. Se desarrollan sobre materiales no consolidados o débilmente consolidados, generalmente coluvios, arcosas, margas y margas yesíferas, limos, etc.

En la zona de muestreo se distinguen los siguientes tipos:

- Regosoles eútricos (Rge) poseen una saturación en bases por lo menos del 50% entre los 20-50 cm de la superficie y que no son calcáreos en esa profundidad, mientras que los
- Regosoles dístricos (RGd) presentan una saturación en bases < 50% entre esos 20-50 cm. Ambos carecen de carbonato cálcico y su salinidad es baja. El pH en los eútricos se aproxima a 8 mientras que en los dístricos suele estar un poco por encima de 5,5.

### 1.4.4. Luvisoles (LV)

Junto con los cambisoles, son los suelos que mayor representación tienen en la CAM y son los de más clara vocación agrícola, dedicándose al cultivo de cereales. Presentan un horizonte B con un claro enriquecimiento en arcilla que en parte es iluvial. En la formación de este horizonte B actúan dos procesos: uno de argilización o simple acumulación de arcilla y otro de argiluvación, por el que la arcilla se acumula consecuencia de un lavado. Han de tener una capacidad de cambio igual o superior a 24 meq/100 gr arcilla y un grado de saturación del 50% o más en la totalidad del horizonte B.

En la zona de muestreo se distinguen los siguientes tipos:

- Luvisol háplico (LVh) no presenta acumulaciones calcáreas en el horizonte B ni en el C. Muestra valores de pH próximos a 7 y de saturación entre 70-85%, textura franco-arcillo-arenosa, buena permeabilidad, pobre en MO y sin problemas de salinidad.
- Luvisol cálcico (LVk) presenta un horizonte cálcico o concentraciones de caliza blanda pulvurulenta, o ambos dentro de los 125 cm a partir de la superficie. Son los luvisoles más frecuentes de la Comunidad de Madrid. Son suelos de textura arcillosa o franco-arcillosa, pobres en MO, permeabilidad media, alta retención de agua, prácticamente sin piedras y carbonatos en B pero fuerte acumulación de carbonato en C. El pH es algo superior a 7 y están fuertemente saturados en bases.
- Luvisol gleico (LVg) presenta problemas hidromórficos en los primeros 100 cm a partir de la superficie, tienen valor de pH y de saturación en bases más bajo. Son, de los luvisoles, los de más baja permeabilidad.

## 1 INTRODUCCIÓN

---

### 1.4.5. Fluvisoles

Son suelos poco evolucionados edáficamente, ya que se desarrollan sobre depósitos aluviales recientes sin tiempo para alcanzar una mayor diferenciación genética y, por tanto, imposible de distinguir en cortes, calicatas o perfiles de estos suelos otro horizontes que no sea uno superficial algo más oscuro por un mayor contenido en materia orgánica y mejor estructurado. Es el denominado horizonte A.

Se distinguen dos tipos de Fluvisoles:

- Fluvisol eútrico (FLe), con grado de saturación en bases del 50% o más entre los 20-50 centímetros de la superficie, pero que no son calcáreos dentro de esos límites.
- Fluvisol calcárico (FLc): poseen carbonato calcio, por lo menos entre los 20-50 cm de la superficie.

## 1.5. INFLUENCIA DE FACTORES AMBIENTALES EN LA GEOQUÍMICA DE SUELOS Y AGUAS

### 1.5.1. Contaminación medioambiental en suelos

En las últimas décadas han aumentado considerablemente los niveles de contaminación del medioambiente, asociándose este incremento al nivel de desarrollo tecnológico e industrial de nuestra sociedad, generadora creciente de nuevos compuestos difícilmente biodegradables.

La contaminación medioambiental del suelo puede asociarse, bien a un incremento en los contenidos de los componentes del suelo por causa antropogénica, bien a un incremento de los riesgos al provocar efectos negativos en el funcionamiento del suelo o en la calidad de los productos vegetales, causando riesgo para la salud humana.

La contaminación antropogénica puede afectar a la atmósfera, hidrosfera y litosfera. El suelo es un medio variable y complejo en su composición, tratándose de un sistema abierto en el espacio y en el tiempo que evoluciona hasta alcanzar el equilibrio. Así, el suelo puede considerarse un sistema depurador capaz de degradar o inmovilizar sustancias contaminantes, actuando a) como fuente para los contaminantes, b) como filtro retardador del paso de dichos contaminantes a las aguas subterráneas o c) como birreactor en el que los compuestos orgánicos pueden descomponerse.



Los suelos, como parte de un ecosistema, se comportan generalmente como sistemas tamponados y bajo condiciones naturales son estables y resistentes a grandes cambios.

Desgraciadamente, algunas acciones del hombre y/o desastres naturales influyen negativamente alterando el equilibrio ecológico y causando, a corto plazo, daños drásticos al sistema suelo que son, en muchos casos, irreversibles.

La contaminación del suelo hace referencia a la presencia de un elemento o sustancia en concentración superior a la natural, como resultado de la actividad humana y que, por lo tanto, tiene un efecto negativo en el medioambiente y sus componentes (Knox, A.S. et al., 1999).

Entre los posibles elementos o sustancias contaminantes se encuentran los metales pesados, los cuales forman parte de la corteza terrestre como constituyentes naturales (contenido litológico) y se distribuyen por la atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera a través de ciclos biogeoquímicos.

Los metales pesados pueden dividirse en:

-  Oligoelementos o micronutrientes: requeridos a nivel de trazas por parte de los organismos para completar su ciclo vital, siendo tóxicos a niveles superiores, tales como el As, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn.
-  Metales pesados sin función biológica conocida: son altamente tóxicos y tienden a acumularse en los organismos, tales como el Cd, Hg, Pb, Sb y Bi.

El incremento incesante de la contaminación ha conducido a la necesidad del estudio y comprensión de la evolución y destino de los contaminantes presentes en el medioambiente y de sus posibles efectos sobre los organismos vivientes (Salomons, W. & Förstner, U. 1995). En suelos no contaminados los contenidos en metales están relacionados con los contenidos en el material original y se incrementan cuando existen aportes antropogénicos, pudiéndose alcanzar niveles de contaminación. Sin embargo, el riesgo que un elemento puede tener para el medio ambiente y la cadena alimenticia no depende sólo del contenido total sino también de la naturaleza y proporción de formas disponibles de dicho elemento.

## 1 INTRODUCCIÓN

---

### 1.5.1.1. Fuentes y riesgos de contaminación

El suelo es el mayor y más importante sumidero de elementos traza del medio terrestre. Sin embargo, el suelo tiene una capacidad finita de retención, por lo que aproximarse o excederse a esta capacidad podría dar lugar a consecuencias medioambientales como, por ejemplo, un incremento en la movilidad del elemento, pudiendo causar biotoxicidad al sistema suelo-planta-animal. Así, por ejemplo, el transporte y difusión de contaminantes del suelo en dirección hacia aguas subterráneas se debe a que se ha sobrepasado la capacidad de retención del suelo.

Como ya se mencionó anteriormente, el destino de los contaminantes dentro del suelo va a depender no solamente de la concentración total de contaminante, sino también de la proporción y naturaleza de formas disponibles, parámetros a tener en cuenta a la hora de hacer un estudio de contaminación del suelo y análisis de riesgos.

Geoquímicamente hablando, un elemento introducido en el suelo puede encontrarse en una o más de las siguientes formas:

- disuelto en la solución del suelo,
- retenido en posiciones de intercambio de compuestos orgánicos e inorgánicos,
- incluido o fijado dentro de los minerales del suelo,
- precipitado independientemente o con otros compuestos del suelo e
- incorporado al material biológico.

La actividad de los metales en la solución del suelo, generalmente, es resultado de su equilibrio con los minerales de arcilla, materia orgánica, hidróxidos de Fe y Al, complejos quelantes solubles, interviniendo el pH del suelo, que afecta intensamente este equilibrio (Lindsay, W.L., 1972). Por otro lado, la salida del elemento contaminante del sistema puede llevarse a cabo por procesos de volatilización, drenaje, erosión o extracciones mediante cosechas.

Las fuentes contaminantes pueden ser endógenas o naturales y exógenas o antropogénicas. El material original o roca constituye la fuente natural de elementos traza en el suelo. Así, en la tabla 1.1, se expresa la concentración de metales pesados en muestras de distinto origen geológico, tales como suelos, rocas y sedimentos.

## 1.5 INFLUENCIA DE FACTORES AMBIENTALES EN LA GEOQUÍMICA DE SUELOS Y AGUAS

Tabla 1.1. Concentraciones medias de As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn observadas en matrices medioambientales de origen geológico ( $\mu\text{g/kg}$ ) (Cannon, H.L., 1978, Polemio, M. et al., 1982).

	Rocas Ígneas	Rocas calizas	Areniscas	Pizarra	Carbón	Fangos depuradora	Suelos	Sedimentos
<b>As</b>	0.06-113	0.1-20	0.6-120	0.3-500	0-2000	3-30	0.1-55	<0.40-455
<b>Cd</b>	0.001-0.6	-	-	-	0.07-0.18	2-1100	<1-69	0.04-800
<b>Cr</b>	-	-	35	-	10-1000	-	10-150	<25-75
<b>Cu</b>	10-100	0.6-13	6-46	-	1-49	100-1000	2-250	<205-50
<b>Ni</b>	2-3600	20	2	-	3-50	-	23.1	<20-50
<b>Pb</b>	2-30	9	<1-31	-	>60	136-7627	2-300	<40-60
<b>Zn</b>	5-1070	<1-180	5-170	15-1500	3-300	1000-10000	1-900	<90-200

La contaminación antropogénica puede deberse a fuentes primarias, si el metal es añadido directamente o, a fuentes secundarias, si su presencia se debe a cualquier actividad cercana (Tabla 1.2). Como fuentes antropogénicas se consideran las actividades urbanas, industriales y agrícolas, todas ellas productoras de residuos líquidos, sólidos y gaseosos con posibles elementos contaminantes.

Tabla 1.2. Fuentes de contaminación antropogénica de suelos y sedimentos (Fergusson, J.E. 1990, Patterson, W.J. & Pasino, R., 1987).

Fuentes Primarias	Elementos	Fuentes Secundarias	Elementos
Fertilizantes	As, Cd, Pb	Aerosol de automóviles	Pb
Cal	As, Pb	Fundiciones	As, Cd, Hg, In, Pb, Sb, Se
Pesticidas	As, Pb, Hg	Residuo de incineradoras	Cd, Pb
Fangos de aguas residuales	As, Cd, Pb	Áreas mineras	As, Cd, Hg, Pb
Irrigación	Cd, Pb, Se	Neumáticos	Cd
Abonos	As, Se	Pintura	Cd, Pb
		Combustión de carbón	As, Pb, Se, Sb
		Industria cloroalcalina	Hg

Las principales zonas contaminadas son vertederos, urbanos e industriales, áreas cercanas a zonas de actividad minera, industrias del hierro, armamentística y de fertilizantes y pesticidas. Concretamente, en agricultura, el uso de fertilizantes, pesticidas inorgánicos, aguas residuales y abonos orgánicos suponen una importante fuente de contaminantes.

## 1 INTRODUCCIÓN

---

Entre las posibles causas de contaminación del suelo se encuentran:

- 1- Almacenamiento incorrecto de productos y residuos industriales
- 2- Vertidos incontrolados de residuos y de aguas residuales
- 3- Fugas
- 4- Uso incorrecto de pesticidas y abonos

Todo ello afecta a las disoluciones acuosas que alcanzan las capas superficiales y freáticas, incidiendo en los organismos vegetales y animales.

Los riesgos que suponen la contaminación de un suelo dependerán de la toxicidad y carácter acumulativo de cada elemento. El concepto de bioacumulación se entiende como la acumulación de los contaminantes en los organismos, mientras que el índice de bioacumulación hace referencia a la relación entre la cantidad de un contaminante en un organismo con la concentración de ese contaminante en el suelo (Förstner, U. 1988). Consecuencia de las emisiones y/o vertidos ha sido el favorecimiento de la biodisponibilidad de los metales y, consecuentemente, de su toxicidad. Las vías de exposición pueden ser múltiples: agua, aire, vegetales, animales, suelo, pinturas, etc. pasando al ser humano por inhalación, ingestión o absorción a través de la piel.

### 1.5.1.2. Calidad del suelo y valores de referencia

Las definiciones más recientes de calidad del suelo fueron sintetizadas por el Comité de Salud del Suelo de la *Soil Science Society of America* (Karlen et al., 1997), al establecerla como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat.

El suelo, en la mayoría de los casos, es receptor directo de contaminantes, vía aérea, aguas superficiales, vertidos directos o incorporación desde el subsuelo vía meteorización geoquímica. La dinámica de los procesos de sorción-desorción de los contaminantes dependerá de las propiedades hidrológicas del suelo, composición del suelo y propiedades físico-químicas.

La capacidad de amortiguación de un suelo es decisiva a la hora de valorar el riesgo de que los contaminantes pasen a la cadena trófica o dañen otros compartimentos medioambientales.



Un suelo de buena calidad no debe producir daños a seres humanos u otras especies en cualquier uso que hagan del mismo, debe poder funcionar sin restricciones en los procesos naturales y no debe contaminar otros elementos del medio ambiente (Moen, 1988). La calidad del suelo queda definida de acuerdo a su adecuación para la consecución tanto de funciones naturales como de uso.

La calidad de un suelo, por tanto, puede definirse conforme a tres criterios: 1) la protección de la salud humana, 2) la protección de los ecosistemas y 3) la prevención de la dispersión de la contaminación y consiguiente protección del resto de los compartimentos ambientales.

Los suelos juegan un importante papel en el funcionamiento y en la sostenibilidad a largo plazo de los ecosistemas. Para conseguir tal objetivo se debe actuar preferentemente sobre la prevención y la recuperación urbana e industrial. La *prevención* de la contaminación es el elemento clave y objetivo prioritario. La *regeneración urbana e industrial* exigen la recuperación paulatina de los suelos contaminados, a través de una gestión basada en la evaluación de los riesgos que suponen para la salud humana, los ecosistemas y el resto de compartimentos ambientales.

Debido a que los cambios que se producen en el suelo son lentos y difíciles de cuantificar, durante mucho tiempo se ha ignorado el desarrollo de estándares de calidad de suelos, comparado con el desarrollo de estándares de calidad de agua o aire.

Para poder cuantificar la calidad de un suelo se debe disponer de Índices de Calidad de Suelos o Valores de Referencia, de acuerdo al uso del mismo (tabla 1.3) (*Canadian Environmental Quality Guidelines, 2003*).

Los criterios sobre calidad del suelo reflejan los objetivos de calidad para el suelo y, por tanto, los objetivos finales de la política a desarrollar en este campo. Estos criterios deben traducirse a estándares de calidad científicamente defendibles y prácticos.

Los *estándares de calidad* reciben el nombre de **valores indicativos de evaluación** (VIE), pues permiten una evaluación genérica rápida de la calidad del suelo.

## 1 INTRODUCCIÓN

Tabla 1.3. Estándares de calidad de suelos (mg/kg).

Parámetro	Uso agrícola	Uso residencial y áreas verdes	Uso comercial e industrial
Arsénico	12	12	12
Bario	750	500	2000
Cadmio	1.4	10	22
Cromo total	64	64	87
Cromo (+6)	0.4	0.4	1.4
Cobre	63	63	91
Plomo	70	140	260-600
Mercurio	6.6	6.6	24-50
Níquel	50	50	50
Vanadio	130	130	130
Zinc	200	200	360
Fenoles	3.8	3.8	3.8
Cianuro	0.9	0.9	8
Benceno	0.05	0.5	5
Tolueno	0.1	0.8	0.8
Xileno	0.1	1	17-20
Etilbenceno	0.1	1.2	20
Etilglicol	960	960	960
Bifenilos policlorados	0.5	1.3	33
Benzopireno	0.1	0.7	0.7
Nafteno	0.1	0.6	22

De los tres criterios definitorios, sólo la protección de la salud humana y la protección del funcionamiento de los ecosistemas se han tenido en cuenta para establecer los VIE. El tercer criterio, la prevención de la dispersión y afección a otros compartimentos medioambientales, se considera tan dependiente de factores locales que no estima oportuno la deducción de unos valores de aplicación general y únicamente se evalúa a través de análisis de riesgos.

Los VIE se definen en función de los riesgos potenciales que comportan a los objetos protegidos. Se establecen 3 niveles de riesgo:

- Nivel A o Nivel de Referencia: por debajo del cual se considera que no existe riesgo o éste es despreciable.
- Nivel B: marca el límite inferior de aceptabilidad del riesgo; por debajo de este valor y por encima del A puede aceptarse, con una cierta fiabilidad, como suelo de buena calidad; mientras que por encima de este valor existe riesgo de afección para la salud humana y medio ambiente.

## 1.5 INFLUENCIA DE FACTORES AMBIENTALES EN LA GEOQUÍMICA DE SUELOS Y AGUAS

---

- Nivel C o de máximo riesgo tolerable: representa el límite superior de aceptabilidad del riesgo. Su superación indica un peligro grave para la salud pública y el funcionamiento de los ecosistemas.

La deducción de los distintos valores de calidad se fundamenta en la asunción de que la contaminación del suelo es consecuencia de la actividad humana (actividades urbanas, industriales y agrícolas), productora de un incremento considerable del contenido en el suelo de determinadas sustancias, causantes de los efectos nocivos sobre la salud humana y/o el medio ambiente. En ausencia del hombre los suelos representan un riesgo despreciable, en consecuencia el nivel de referencia se establece de acuerdo a la información sobre contenidos naturales en el suelo, lo que se conoce como nivel de fondo, mientras que la deducción de los niveles B y C se enmarca en el método general de análisis de riesgos.

El valor de referencia puede obtenerse mediante dos métodos:

- 1) Estableciendo las correlaciones entre arcilla y/o materia orgánica de suelo estándar (no contaminado) y los contenidos en metales.
- 2) Sumando a la media de los valores o nivel de fondo, dos veces la desviación típica (S):  
 $VR = X (\text{valor medio}) + 2S$ . Este criterio se adopta cuando no hay correlación o ésta no es significativa.

Los estándares deben ser de tipo cuantitativo y traducirse en términos de concentraciones de las sustancias potencialmente contaminantes en el suelo. Para los valores de prevención, la selección del parámetro de medida resulta más compleja al referirse a una situación que no está actualmente afectada, sino que existen riesgos de que sea afectada. Además deben cumplir el objetivo de uniformidad, especialmente importante en la evaluación de suelos ya contaminados.

Entre los factores implicados en el grado de contaminación de un suelo se encuentran: 1) Naturaleza y concentración de las sustancias contaminantes, 2) Factores locales como factores edáficos (%arcilla, %MO, pH), geológicos (tipo substrato, fisuras) y climáticos (pluviometría), que influyen en el comportamiento medioambiental de las sustancias, determinando su disponibilidad y grado de dispersión 3) Uso del suelo, determinando el grado de exposición real al contaminante así como las posibilidades de dispersión.

Este factor hace que, en condiciones similares, determinadas áreas sean consideradas más sensibles según el tipo y número de vías de exposición.

De estos factores, el primero es de tipo genérico, mientras que los otros dos son específicos del lugar, especialmente el uso del suelo que puede variar, no sólo en el espacio, sino también en el tiempo, para un mismo emplazamiento. Los tres factores han de tenerse en cuenta a la hora de evaluar un suelo contaminado.

Para ello se establecen unos valores genéricos de acuerdo al primer factor, pero incluyendo por medio de relaciones matemáticas sencillas, aquellas variables locales cuantificables (variables edáficas relacionadas con los procesos de adsorción-desorción en la matriz del suelo como materia orgánica y arcilla, o con la caracterización de los escenarios de exposición).

Los valores así deducidos se convierten en los valores indicativos de evaluación (VIE), que permiten una evaluación rápida de la calidad del suelo en un emplazamiento y establecen las pautas de investigación a realizar.

### 1.5.2. Contaminación medioambiental en aguas superficiales

#### 1.5.2.1. Fuentes de contaminación

Las fuentes de contaminación de un agua pueden ser difusas, como la acidificación por lluvia ácida o contaminación por nitrato debido al uso de fertilizantes; o localizadas, como son los vertederos y depósitos de residuos químicos, a partir de los cuales, compuestos orgánicos y metales pesados pueden llegar a las aguas.

La contaminación de las aguas superficiales se produce principalmente por acción del hombre, directamente a través de la eliminación de residuos sanitarios no tratados y de compuestos químicos orgánicos o inorgánicos a ríos y lagos o indirectamente, por ejemplo, por el excesivo crecimiento de algas al añadir nutrientes a los ríos y lagos, por la intrusión de agua de mar a los pozos o por un aumento de carga de sedimentos en ríos, debido a la deforestación o sobrepastoreo.

Es importante entender ciertos procesos relacionados con los procesos naturales que controlan la calidad del agua para hacer frente a los cada vez mayores y crecientes problemas relacionados con la contaminación ambiental del agua. Así, por ejemplo, las aguas de ríos que se encuentran bien oxigenadas van a ser capaces de convertir residuos orgánicos en formas inocuas.

## 1.5 INFLUENCIA DE FACTORES AMBIENTALES EN LA GEOQUÍMICA DE SUELOS Y AGUAS

---

Sin embargo, en un río sobrecargado de residuos orgánicos el proceso natural de purificación se va a ver colapsado.

Existen especies inorgánicas, como el cloruro, que pueden ser dispersadas en el ambiente sin causar serios problemas. Sin embargo, otros solutos tienden a acumularse y concentrarse en sedimentos del río o en la biota y pueden llegar a liberarse de manera inesperada causando concentraciones locales problemáticas.

A veces el material añadido a un río no se ajusta al término de contaminante, pero puede producir un efecto medible en mayor o menor medida en la concentración de iones disueltos. La adición de materia orgánica en aguas subterráneas disminuye el potencial redox produciéndose un cambio en el balance geoquímico del sistema. Cambios en el pH pueden causar la disolución de los minerales de una roca.

Las actividades mineras y la obra civil traen consigo, en muchos casos, la afección a la calidad de las aguas del entorno, fundamentalmente a las aguas superficiales, pero también, directa o indirectamente, a las subterráneas. El problema radica en que cuando el hombre actúa provocando, por ejemplo, un drenaje, tratamiento minero o movimiento de tierra, entran en juego una serie de circunstancias desencadenantes de la contaminación de las aguas que perduran por muchísimo tiempo después incluso del abandono de la actividad.

Las aguas de mina procedente de explotaciones metálicas pueden presentar pH ácidos debido a la reacción entre las piritas (u otros sulfuros) existentes en el yacimiento explotado, aire y agua donde la bacteria *Thiobacillus* actúa como catalizadora.

Característica de las aguas ácidas es la elevada conductividad, contenido total de sólidos disueltos, contenido de sulfatos procedentes de la oxidación de los sulfuros y, por supuesto, tasas relativamente elevadas de metales, que son solubles por dichas aguas con pH bajo. El problema que presenta esta agua es que, una vez disueltos los metales, la reacción de precipitación no siempre tiene lugar al recuperar un pH neutro sino que exige un tratamiento para su eliminación.

Fertilizantes usados en agricultura añaden, entre otros elementos, fósforo y nitrógeno, los cuales favorecen la proliferación de algas en aguas superficiales. Abonos, insecticidas, pesticidas y otros suponen riesgo para las aguas superficiales y subterráneas. La agricultura en sí misma afecta a la calidad de las aguas subterráneas y ríos por simple concentración de sales y por alteración de los procesos en el suelo pudiendo originar un aumento en la concentración de nitratos.

## 1 INTRODUCCIÓN

---

El uso de productos radioactivos (núcleo de reactores nucleares y depósitos de almacenamiento de productos de fisión) es una fuente potencial de contaminación, así como también lo es la navegación por ríos y canales.

### 1.5.2.2. Factores medioambientales que controlan la composición de las aguas naturales

El estudio de los factores medioambientales relacionados con la composición de un agua concierne sobre todo a hidrogeólogos y entre estos factores se encuentran el clima, efectos geológicos y factores bioquímicos.

La influencia del clima en la calidad del agua depende de procesos como la alteración de las rocas asociada a la temperatura y a la cantidad y distribución de lluvias. Ciertos constituyentes iónicos del agua están más influenciados por los efectos climáticos que otros, como es el caso del bicarbonato, el cual tiende a predominar en las aguas de zonas donde la vegetación es abundante.

Los factores geológicos se relacionan con la pureza y tamaño de cristal, textura de la roca y porosidad, estructura regional, grado de fisuramiento, etc. La temperatura de la roca aumenta con la profundidad, por lo que el agua que circule a cierta profundidad tendrá una temperatura más elevada que el agua cercana a la superficie de la tierra. Este sería el caso de aguas termales cuyo contenido en solutos es, generalmente, mayor que en aguas superficiales más frías.

Los factores bioquímicos hacen referencia a la influencia, en mayor o menor grado, de los procesos vitales de plantas y animales en la composición del agua, tales como:

- Procesos que capturan energía procedente del sol u otra fuente, que promueven reacciones químicas que requieren energía. Ejemplo: fotosíntesis.
- Procesos que redistribuyen químicamente la energía almacenada. Ejemplo: metabolismo.
- Procesos sin una transferencia de energía significativa. Ejemplo: reacciones que favorecen la reducción y oxidación química.

Finalmente, mencionar que algunos de los procesos formadores del suelo son los mismos que controlan la composición natural del agua y, por tanto, existe una relación considerable entre la química del agua y la química del suelo. Gran parte de la precipitación atmosférica que llega a la tierra cae sobre la superficie del suelo.

Generalmente, la fracción que aparece como escorrentía o agua subterránea ha tenido algún contacto con el suelo y gran parte de ella ha pasado bastante tiempo como humedad del suelo. Entre los factores que influyen en la composición química de la humedad del suelo se encuentran la solución o alteración de silicatos u otros minerales, la precipitación de sales muy poco solubles (carbonato cálcico), eliminación selectiva y circulación de nutrientes por las plantas, reacciones bioquímicas productoras de dióxido de carbono, adsorción y desorción de iones en superficies orgánicas y minerales, concentración de solutos por evapotranspiración y conversión del gas nitrógeno a formas disponibles para la nutrición vegetal. De estos, uno de los más importantes es la producción de dióxido de carbono. El aire en los intersticios del suelo es entre 10-1000 veces más rico en  $\text{CO}_2$  que en el aire común (Buckman and Brady, 1960). El agua que se mueve a través del suelo disuelve parte de este  $\text{CO}_2$ , y los iones  $\text{H}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  son iones muy fuertes en el control del pH del agua y en el ataque de los minerales de la roca.

### 1.5.2.3. Distribución de las especies metálicas en solución

El comportamiento de los elementos metálicos en aguas naturales condiciona su biodisponibilidad y, por tanto, su capacidad de incorporación a la biomasa, condicionando su efecto como macro o micronutriente esencial y su biotoxicidad.

Dentro de los macronutrientes esenciales se incluyen elementos metálicos como el Ca, Mg, Na y K, importantes en funciones metabólicas o enzimáticas en microorganismos, animales y vegetales.

La presencia de metales no esenciales como el Hg, Pb, Cd, Ag, Cr, As y Se, sin embargo, suele tener efectos tóxicos.

En aguas naturales no contaminadas el contenido de estos metales no esenciales es de trazas. Concentraciones anormalmente elevadas se asocian al estudio de los efectos tóxicos. Sin embargo, debe tenerse presente que una disminución de la concentración de los elementos metálicos esenciales por debajo del óptimo necesario puede provocar también problemas (Drever, 1997).

Tradicionalmente, los límites de toxicidad se han establecido en función de los contenidos totales, tanto en aguas como en suelos. Estos contenidos totales, sin embargo, van a estar controlados por numerosos procesos de formación de complejos en solución, disolución, precipitación o coprecipitación, sorción y desorción (Drever, 1997).

## 1 INTRODUCCIÓN

---

La formación de complejos de los metales disueltos es esencial en la determinación de su biodisponibilidad, biotoxicidad y efecto sobre los organismos. La biodisponibilidad de iones metálicos libres es, generalmente, mucho mayor que la de sus complejos, de tal manera que no es la concentración total de un determinado metal en el agua la que determina su efecto, sino su concentración como forma iónica libre simple. A este concepto se le denomina, en la literatura biogeoquímica, Modelo de Actividad de Iones Libres (*FIAM o FIM, Free-Ion Activity Model o Free-Ion Model*; Morel y Hering, 1993). Consecuencia directa de este Modelo es que la formación de complejos en solución (por ejemplo, quelatos o complejos orgánicos) va a disminuir la biodisponibilidad o biotoxicidad de los elementos metálicos. Sin embargo, este Modelo de Actividad de Iones Libres presenta excepciones como, por ejemplo, las especies metiladas de Hg son más tóxicas que las especies inorgánicas del Hg. En cualquier caso, se sigue verificando que el efecto tóxico no depende del contenido total de un elemento disuelto, sino de la concentración de una determinada especie de dicho elemento. Son ejemplos, las especies de  $\text{As}^{3+}$  cincuenta veces más tóxicas que las especies de  $\text{As}^{6+}$ , o el  $\text{Cr}^{3+}$  mucho menos tóxico que el  $\text{Cr}^{6+}$ .

En cuanto al pH, el rango más común en aguas superficiales es de 7-8, predominando en la mayoría de los casos las formas libres de muchos metales pesados en condiciones de pH ácido, mientras que las formas complejas lo hacen en condiciones de pH básico, de ahí la magnitud de la problemática de las aguas ácidas en medio natural.

### 1.5.2.4. Relación calidad agua-litología

La calidad de un agua queda definida por su composición y el conocimiento de los efectos que puede causar cada uno de los elementos que contiene, o el conjunto de todos ellos, permite establecer las posibilidades de su utilización, clasificando así, de acuerdo con límites estudiados, su destino para bebida, usos agrícolas, industriales, etc. (Custodio y Llamas, 1983. pág. 1884). El estudio de la calidad del agua destinada a ser consumida por el hombre supone tener en cuenta distintas características del agua (físico-químicas, bacteriológicas, biológicas y radiactivas) y que se cumplan los criterios de calidad establecidos para cada una de ellas. En el caso de usos agrícolas, el análisis de una muestra de agua no es suficiente para dictaminar sobre su posible utilización para riego, ya que deben considerarse también otros factores, como son la permeabilidad y calidad del suelo, tipo de cultivo, etc. En aguas para uso industrial, la calidad se ve afectada principalmente por la agresividad y el poder incrustante del agua.



## 1.5 INFLUENCIA DE FACTORES AMBIENTALES EN LA GEOQUÍMICA DE SUELOS Y AGUAS

El grado en el que la composición de un agua se relaciona con la litología de una zona ha sido estudiado por muchos investigadores.

La composición del agua, por un lado, va a depender del material por el que circule. Así, por ejemplo, rocas ultrabásicas son ricas en olivino y piroxeno, por lo que el  $Mg^{2+}$  será el catión dominante de esta agua. Del mismo modo, el  $Ca^{2+}$  es el catión dominante en suelos calcáreos y cuando el  $Ca^{2+}$  y el  $Mg^{2+}$  están presentes en concentraciones similares, probablemente deriven de la dolomita ( $CaMg(CO_3)_2$ ).

La tabla 3.39 muestra los intervalos de concentración de elementos derivados de minerales así como las posibles fuentes del elemento en muestras de agua no contaminadas.

Tabla 1.4. Rangos de concentración normal en muestras de agua no contaminadas y fuentes de elementos.

Elemento	Concentraciones (mmol/l)	Fuente
$Na^+$	0.1-2	Feldespatos, sal, zeolita, atmósfera
$K^+$	0.01-0.2	Feldespatos, mica
$Mg^{++}$	0.05-2	Dolomita, serpentina, piroxeno, anfíbol, olivino, mica
$Ca^{++}$	0.05-5	Carbonato, yeso, feldespato, piroxeno, anfíbol
$Cl^-$	0.05-2	Sal, atmósfera
$HCO_3^-$	0-5	Carbonatos, materia orgánica
$SO_4^{2-}$	0.01-5	Atmósfera, yeso, sulfuros
$NO_3^-$	0.001-0.2	Atmósfera, materia orgánica
$SiO_2$	0.02-1	Silicatos
$Fe^{2+}$	0-0.5	Silicatos, siderita, hidróxidos, sulfuros
$PO_4^{2-}$	0-0.02	Materia orgánica, fosfatos

Es importante tener en cuenta el tiempo de residencia, el flujo (o cambios de flujo) y las características de la procedencia del agua analizada, con el fin de demostrar cómo adquiere el agua su composición y describir los procesos que van a modificar esta composición.

Los procesos implicados en la formación del suelo y la composición del suelo en una zona determinada influyen considerablemente tanto en la composición de las aguas superficiales como subterráneas. La mayoría de las rocas son mezclas complejas de minerales que difieren ampliamente en su estabilidad o solubilidad en el agua. La mayor parte de las rocas, a excepción de las evaporíticas, se componen de minerales poco solubles.

Entre los procesos más importantes que afectan a la química del agua se encuentran:

a) *Evaporación y evapotranspiración*: conducen a un aumento en las concentraciones proporcional a la cantidad de agua que se evapora.

b) *Toma selectiva de iones por la vegetación y almacenamiento*: afectan profundamente a las concentraciones de elementos. Elementos como el P influyen fuertemente en el ciclo biológico, mientras que otros elementos como el Mg y el S son menos importantes. El fósforo se encuentra en aguas naturales y residuales, casi exclusivamente en forma de fosfatos, en solución, partículas o detritus, o en los cuerpos de organismos acuáticos. Los ortofosfatos aplicados como fertilizantes agrícolas son arrastrados a las aguas superficiales con las lluvias y, en menor proporción, con la nieve derretida. La vegetación puede además adsorber gases de la atmósfera ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_2^-$ ). La toma y liberación de elementos por parte de la planta presenta variaciones estacionales y varía entre una planta joven y una planta madura.

c) *Descomposición de la materia orgánica*: consiste en una reacción de oxidación donde se produce ácido carbónico. La descomposición de la materia orgánica puede derivar en otras reacciones como la reducción de óxidos de hierro, sulfato y nitrato o la formación de metano. Además, la producción de  $\text{CO}_2$  va a influir en las reacciones relacionadas con los minerales carbonatados. La materia orgánica contiene elementos minoritarios como P, K, N, S, etc.

d) *Alteración y disolución de carbonatos, silicatos o minerales evaporíticos* liberan elementos al agua. El origen de los bicarbonatos es principalmente la disolución de la caliza. En un agua natural existen iones  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y  $\text{CO}_2$  disuelto, en parte como tal y en parte como  $\text{CO}_3\text{H}_2$ . El carbonato cálcico en forma de calcita es poco soluble en agua pura mientras que el bicarbonato cálcico presenta un producto de solubilidad más elevado y, por tanto, precipita más difícilmente que el carbonato cálcico. Los carbonatos y evaporitas se disuelven rápidamente modificando considerablemente la composición del agua en el suelo, mientras que los silicatos lo hacen lentamente. La sílice está asociada a la descomposición de los silicatos. Las aguas procedentes de esquistos, cuarcitas, etc, suelen tener contenidos en sílice moderados, generalmente inferiores a 30 mg/l.

e) *Precipitación de minerales*: La alteración de silicatos da lugar, generalmente, a la formación de minerales de arcilla secundarios, los cuales consisten básicamente en silicatos de Al con o sin otros cationes.

f) *Reacciones de intercambio iónico*: entre los cationes disueltos y el complejo de cambio (arcillas, minerales alterados y materia orgánica) de sedimentos tienen un efecto importante en la composición química del agua. El intercambio iónico tiende a suavizar los gradientes de concentración en mezclas de agua.

El potasio, al igual que el sodio, presenta una solubilidad muy elevada y es fácilmente afectado por el cambio de bases. Se absorbe de forma muy poco reversible por las arcillas en formación (paso de montmorillonita a illita), para formar parte de su estructura, circunstancia que los diferencia notablemente del sodio. Por ello las aguas naturales, a pesar de la mayor abundancia de K en muchas rocas, tienen mucho menos  $K^+$  que  $Na^+$ , excepto en las muy diluídas (Custodio et al. 1983, pág. 203). El origen del sodio y potasio presente en estas aguas se debe posiblemente a una fuente de sodio diferente a la halita o albita y al intercambio iónico.

g) *Mezcla de diferentes calidades de agua*: es importante cuando el agua transporta sustancias contaminantes.

h) *Actividades antropogénicas*: principalmente el uso excesivo de nitratos en agricultura y fertilizantes. Iones como el  $NO_3^-$  y  $SO_4^{2-}$  son de origen principalmente industrial. Los gases procedentes del tráfico pueden oxidarse en la atmósfera y dar lugar a  $HNO_3$  y  $H_2SO_4$ , con lo que el pH disminuye y se origina la *lluvia ácida*.

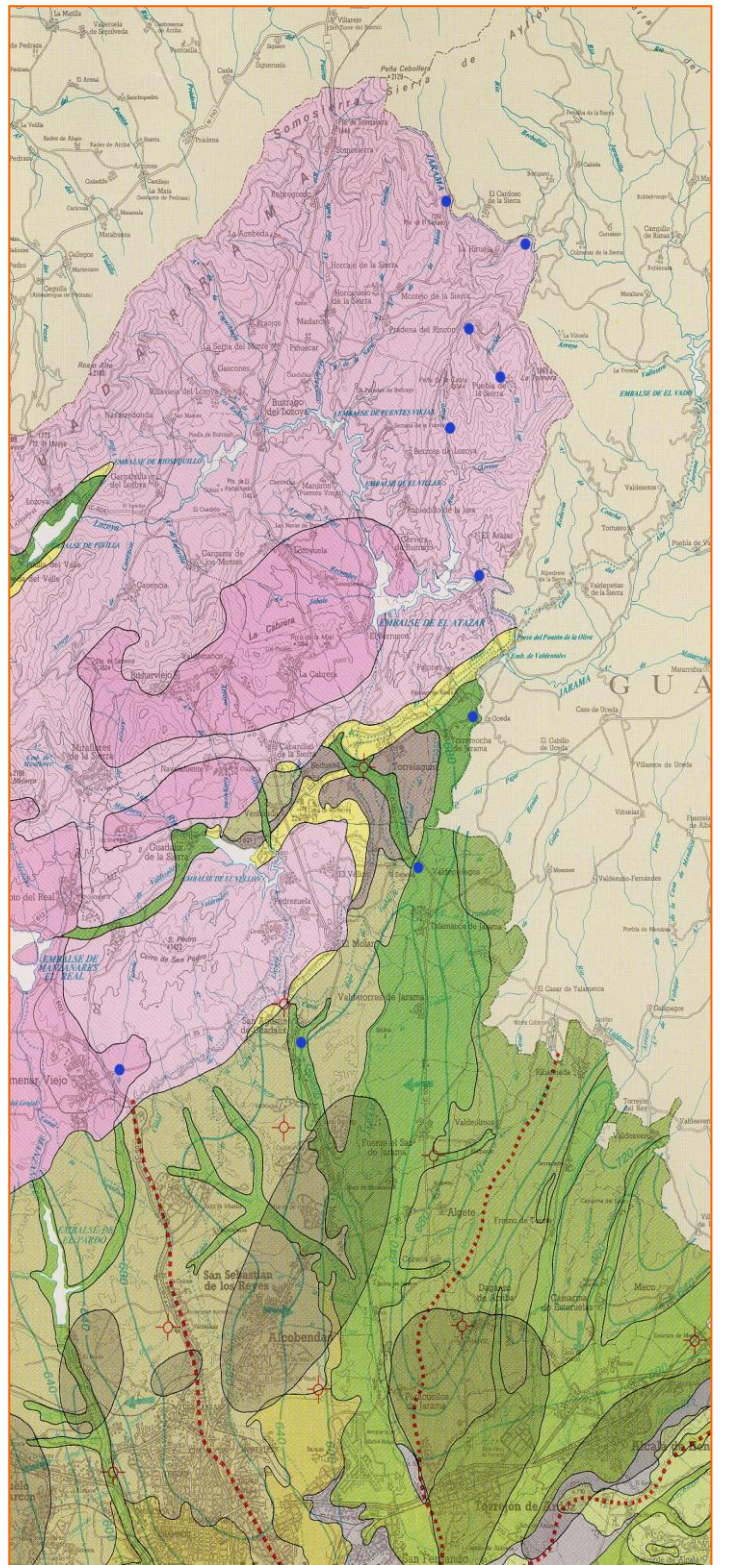
Los constituyentes del agua que más se relacionan con la composición mineral de rocas y suelos son la sílice disuelta y los cationes. Aunque el balance de cationes y aniones debe mantenerse en toda las soluciones, los aniones pueden derivar en gran parte de fuentes no litológicas. Por ejemplo, el bicarbonato en la mayoría de las aguas procede mayoritariamente del dióxido de carbono extraído del aire y liberado al suelo a través de procesos bioquímicos. Por otro lado, algunas rocas son fuentes de cloruro y sulfato por solución directa. La circulación del sulfuro está influida en gran medida por oxidación y reducción biológica, mientras que la circulación del cloruro en la atmósfera es un factor influyente en el contenido de aniones de muchas aguas naturales, próximas a zonas costeras.

La composición del agua va a depender, por tanto, del tipo de roca asociado:

Las **rocas ígneas** se componen predominantemente de silicatos. En función de la proporción de sílice, generalmente en forma de cuarzo, se clasifican en:

- a) Rocas ricas en cuarzo,  $SiO_2 > 10\%$
- b) Rocas pobres en cuarzo y feldespatoides, ambos  $< 10\%$
- c) Rocas ricas en feldespatoides y pobres en cuarzo.

UNIDAD		
--------	--	--



Las aguas superficiales originadas en zonas expuestas a rocas ígneas son pobres en sólidos disueltos debido a que la descomposición de estas rocas es lenta. Las concentraciones son probablemente función del tiempo de contacto y área de superficie sólida expuesta al agua.

Las **rocas sedimentarias** en relación a su composición química se pueden clasificar en:

- De origen detrítico (terrígenas o clásticas):

Incluye areniscas y otras especies compuestas de fragmentos poco alterados de otras rocas. Sedimentos consolidados como las areniscas contienen material cementante depositado sobre la superficie granular y entre los intersticios granulares, el cual es depositado por el agua que ha pasado a través de la roca tiempo atrás y que ha sido redissuelto. Los materiales cementantes más comunes incluyen carbonato cálcico, sílice, hidróxidos de hierro y carbonato ferroso, con añadidos de otros materiales como los minerales de arcilla.

Muchas rocas de este tipo son bastante permeables al agua y pueden recibir y transmitir fácilmente solutos adquiridos por el agua a partir de otro tipo de roca. Las concentraciones de elementos minoritarios en aguas de rocas detríticas se relacionan con la deposición y redissolución de materiales cementantes. Otros factores serían la adsorción e intercambio iónico. Muchas detríticas pueden permanecer en condiciones reductoras durante largos periodos y contener especies minerales reducidas como la pirita. Las soluciones que pasan a través de estas rocas en periodos posteriores participarían en reacciones de oxidación-reducción, muchas de ellas mediante microorganismos. El sulfuro de la pirita se oxidaría a sulfato y se liberaría ión ferroso.

Esquistos y rocas sedimentarias de grano fino se componen de minerales de arcilla y material particulado formado a partir de reacciones químicas entre el agua y los silicatos. Contienen también cuarzo finamente dividido y otros minerales en pequeñas partículas.

Los esquistos y rocas similares son porosas, pero no transmiten agua debido a que los intersticios son muy pequeños y están poco unidos. Aguas que circulan por estas rocas suelen contener elevadas concentraciones de sólidos disueltos.

## 1 INTRODUCCIÓN

---

- De origen químico:

Se originan al precipitar diversos compuestos químicos en el interior del medio acuoso en el que se hallan disueltos. Son rocas carbonatadas: calizas (principalmente carbonato cálcico) y dolomías, principalmente  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . No existen formaciones de rocas carbonatadas en las que el magnesio sea más abundante que el calcio. Otros minerales carbonatados pueden existir como impurezas. La disolución de la caliza es el principal proceso de disolución del carbonato cálcico, es una reacción bastante rápida y reversible.

La proporción de magnesio: calcio en las aguas refleja en cierta manera la composición de la caliza. La sílice es un constituyente minoritario del agua procedente de caliza.

Las dolomitas no se disuelven reversiblemente, lo que significa que no se alcanzan las condiciones necesarias para su precipitación directa, al menos en el tipo de medioambiente en el que existe agua subterránea potable.

La elevada solubilidad natural de los sedimentos evaporíticos da lugar a que aguas asociadas a ellos contengan elevadas concentraciones de sólidos disueltos. Yeso y anhidrita son los menos solubles. El yeso puede transmitir agua al igual que lo hace la caliza.

La composición de salmueras naturales se asocia a la composición de depósitos evaporíticos de los cuales derivan y pueden contener minerales de valor económico como el magnesio, potasio, boro, litio y bromuro.

- De origen orgánico:

Incluyen rocas en las cuales han intervenido directamente los seres vivos en su formación y que están formadas por restos de su misma materia orgánica, más o menos transformados. Son los carbones minerales y los hidrocarburos naturales.

Las **rocas metamórficas** se originan por cambios de temperatura y presión sobre otras rocas ya preexistentes de cualquier tipo, de manera que se produce un cambio en las propiedades físicas y, a veces, en la composición mineral.

Gneises y esquistos son rocas densas y no toleran agua. Las aguas que proceden de estas rocas contienen gran cantidad de sílice, asociada a los minerales silicatados de las mismas. La densa estructura de las pizarras y cuarcitas tienden a restringir el movimiento del agua a zonas de fractura, evitando así el contacto con agua subterránea.

Entre las propiedades que son posibles indicadoras de la presencia de rocas metamórficas en la composición de un agua son las elevadas concentraciones de sodio, bicarbonato, boro y pequeñas concentraciones de cloruro (White, 1957b).

### 1.6. LEGISLACIÓN MEDIOAMBIENTAL EN SUELOS

#### 1.6.1. Legislación europea

La legislación europea específica referente a la regulación de aspectos relacionados con la contaminación y recuperación de suelos es escasa y, en la mayor parte de los casos, es indirecta. Destaca la Ley de Protección del Suelo (VROM, 1996), dictada en Holanda y modificada posteriormente en 1998 (VROM, 1998), donde se establecen las líneas de actuación en cuanto a suelos contaminados y remediación, así como las competencias de los distintos organismos en la materia.

La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) estimó, en 1999, entre 300.000 y 1.500.000 el número de zonas o áreas contaminadas en Europa Occidental. Esta gran diferencia de cifras se debe a la inexistencia de un mismo criterio con el que, en los diferentes países, se defina suelo contaminado, se cuantifiquen los riesgos aceptables y se adopten instrumentos y medidas de caracterización.

Gran parte de la legislación medioambiental europea se basa en la estimación del contenido total de metales, el cual, sin embargo, no se encuentra correlacionado significativamente con la concentración de metales en las plantas. Este concepto supone considerar que toda la sustancia contaminante se encuentra de forma disponible o movilizable y no tiene en cuenta que la movilidad y biodisponibilidad del contaminante va a depender de la forma específica en que el contaminante se encuentre en el suelo.

Muchos países europeos han establecido niveles preventivos adicionales a los límites establecidos en el Anexo 1º del Consejo Directivo 86/278/ECC, relativa a la protección del medioambiente en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura (Tabla 1.5).

Para salvaguardar la calidad del suelo se establecen niveles de referencia, niveles de investigación y niveles de intervención, en función del nivel de contaminación o los usos a los que se destinen los suelos.

Los valores guía más comúnmente utilizados son los del sistema A-B-C holandés, actualmente convertido al sistema A-C, diferenciando entre valores de referencia y de intervención.



## 1. INTRODUCCIÓN

Tabla 1.5. Concentraciones máximas permitidas legislativamente de metales en suelos tratados con fangos de estaciones depuradoras, en diferentes países de la comunidad económica europea (mgkg<sup>-1</sup>), Adriano D.C. (2001)

Metal	86/278/ECC	Bélgica	Alemania	Dinamarca	España		Francia	Italia	Holanda	Suiza
			pH<6	30/06/2000	pH<7	pH>7				
Cd	1-3	1.2	1-1.5	0.5	1	3	2	2	0.8	0.4
Cr	-	78	100	30	100	150	150	-	100	30
Cu	50-140	109	60	40	50	210	100	100	36	40
Ni	30-75	55	50	15	30	112	50	75	35	30
Pb	50-300	120	100	40	50	300	100	100	85	40
Zn	150-300	350	150-200	100	150	450	300	300	140	75

El 22 de Septiembre de 2006, la Comisión Europea adoptó una estrategia temática dedicada específicamente a la protección del suelo, consistente en una comunicación de la Comisión a instituciones europeas, una oferta para una directiva de base y una evaluación del impacto. Así, la comunicación COM (2006) 231 fija el marco, objetivos y medidas a seguir; la oferta para la directiva de base COM (2006) 232 establece el modelo a seguir para la protección del suelo, enmendando la Directiva 2004/35/EC, y la evaluación de impacto a través de la SEC (2006) 1165 y SEC (2006) 620, un análisis de las consecuencias para el medio ambiente económicas y sociales. El objetivo general de esta estrategia es prevenir la degradación del suelo y conservación de sus funciones, así como la recuperación del suelo degradado.

### 1.6.2. Legislación estatal española

La primera vez que se abordó el problema de suelos contaminados, como consecuencia de actividades potencialmente contaminantes, fue a través de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos (vigente hasta el día 12 de mayo de 1998) (BOE 120/1986), que establecía la obligación de la Administración General del Estado, de acuerdo con las Comunidades Autónomas, de aprobar un Plan Nacional de suelos contaminados.

A partir de 1991 se comenzó la realización de un primer Inventario de Espacios Contaminados en todo el territorio nacional, completado en 1992 por parte del entonces M.O.P.U.



Posteriormente, el Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados (1995-2005) (BOE nº 114/1995) tuvo como objetivo orientar la actuación de la Administración del Estado en materia de recuperación de Suelos Contaminados, a medio y largo plazo, incorporando los Planes Autonómicos existentes para prevenir la contaminación del suelo y la recuperación de los ya contaminados.

La Ley 10/98, de 21 de abril, de Residuos (BOE 96/1998), en su Título V (artículos 27 y 28), reguló los aspectos ambientales de los suelos contaminados, estableciendo que el Gobierno, previa consulta a las Comunidades Autónomas, determinaría los criterios y estándares que permitan evaluar cuándo un suelo se puede considerar contaminado en función de su naturaleza y de su uso, así como la lista de actividades susceptibles de causar contaminación en un suelo. Establece, además, el concepto de Nivel Genérico de Referencia como la concentración admisible de una sustancia en el suelo, en términos de riesgo para un determinado uso del terreno.

Finalmente, el 18 de enero de 2005 se aprobó un real decreto sobre suelos contaminados, el Real Decreto 9/2005, de 14 de enero (BOE 15/2005), por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. En el caso de suelos ya contaminados, permite identificarlos y caracterizarlos mediante una metodología normalizada y aceptada para evitar el posible riesgo que tendría para la salud de las personas y la protección de los ecosistemas y, finalmente, su remediación. Este Real Decreto vincula el riesgo potencial de un suelo contaminado al futuro uso que se le pretende dar, relacionando la función de soporte de actividad del suelo como factor de ponderación en el análisis obligatorio de riesgo.

De acuerdo con la citada Ley, se establecen tres niveles de protección del suelo para los casos de usos industriales, residenciales y terrenos sin restricciones de uso.

El anexo I establece el listado de actividades potencialmente contaminantes, de tipo industrial o comercial, en las que, ya sea por el manejo de sustancias peligrosas o por la generación de residuos, puede contaminarse el suelo.

El anexo III establece los criterios para la consideración de un suelo como contaminado, siendo considerado como tal, cuando se determinen riesgos inaceptables para la protección de la salud humana o, en su caso, de los ecosistemas, debido a la presencia de sustancias contaminantes recogidas en los anexos V y VI o de cualquier otro contaminante químico.

El punto 3 del anexo VII establece que, para el cálculo de niveles genéricos de referencia para metales, se sumará a la concentración media el doble de la desviación típica de las concentraciones existentes en suelos de zonas próximas no contaminadas y con sustratos geológicos de similares características, siendo aplicables dichos valores a cualquier uso del suelo y atendiendo tanto a la protección de la salud humana como a la protección de los ecosistemas.

El Real Decreto supone un avance importante en materia de legislación ambiental para nuestro país y dentro del ámbito de la Unión Europea, pues no existe una normativa de ámbito europeo y son muy pocos los países (Dinamarca, Holanda, Reino Unido, Alemania, Suecia y Bélgica) los que la han desarrollado de forma específica.

Posteriormente el Ministerio de Medio Ambiente, publicó en Febrero de 2007 la Guía Técnica de Aplicación del citado Real Decreto.

En España, básicamente País Vasco, La Rioja y Cataluña han sido las únicas que han desarrollado sus propias regulaciones y legislaciones específicas sobre suelos contaminados. Sin embargo, éstas siguen considerando el contenido total de metales en lugar de evaluar la movilidad o disponibilidad de los contaminantes presentes en el suelo.

### 1.6.3. Legislación de la Comunidad Autónoma de Madrid

La legislación medioambiental en materia de suelos contaminados, según lo establecido en el artículo 27.1 de la Ley 10/98 Básica de Residuos, impone la obligación legal a los gobiernos regionales de establecer planes o programas específicos para la gestión de suelos contaminados.

Así, el Real Decreto 326/1999, de 18 de noviembre, por el que se regula el régimen jurídico de suelos contaminados de la Comunidad de Madrid (BOCM 280, 25/10/99 y 02/12/99), en su artículo 14, establece que “La Consejería de Medio Ambiente establecerá un Plan Regional de Actuación en materia de Suelos Contaminados que concretará las líneas de actuación a poner en práctica y que incluirá, entre otros, los siguientes aspectos:

1. Prevención de la contaminación de suelos.
2. Control y corrección de la contaminación de suelos, mediante, al menos, un programa sistemático, un programa sectorial y un programa territorial.
3. Programa de investigación y desarrollo, y elaboración de estudios de base y guías metodológicas.
4. Determinación del proceso técnico de gestión y de evaluación de los suelos contaminados.

5. Información y concienciación de los interesados y del público en general.
6. Duración del Plan.
7. Procedimiento de revisión.
8. Plan de inversiones y mecanismos de financiación.”

Fruto del Convenio de colaboración suscrito entre el Instituto Geológico y Minero de España y la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid, se llevaron a cabo una serie de trabajos con el fin de determinar los niveles de fondo y definir los niveles de referencia de metales pesados de los suelos de la Comunidad de Madrid, así como la elaboración de una guía técnica de aplicación de los niveles de referencia para la valoración de la contaminación de terrenos por metales pesados.

Posteriormente, se aprobó el Plan Regional de Actuaciones en materia de Suelos Contaminados de la Comunidad de Madrid, 2001-2006, publicado en el BOCM nº-283, 28 de noviembre de 2001. Este Plan establece, como línea prioritaria de trabajo, “el estudio de los niveles naturales y definición de los valores de fondo de los suelos de la Comunidad de Madrid, y la determinación de los niveles de referencia”.

La Ley 5/2003, de 20 de marzo, de Residuos de la Comunidad de Madrid (BOCM 76/2003), fomenta la reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valoración de los residuos, así como la regulación de suelos contaminados, con el fin de proteger el medioambiente y la salud humana.

Finalmente, la Orden 2770/2006, de 11 de agosto, de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, establece los niveles genéricos de referencia para protección de la salud humana de metales pesados y otros elementos traza en suelos contaminados de la Comunidad de Madrid, obtenidos mediante aplicación de los criterios establecidos en el anexo VII del Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, y que son:

## 1 INTRODUCCIÓN

Tabla 1.6. Niveles genéricos de referencia de metales pesados y elementos traza.

	Industrial (mg/kg)	Urbano (mg/kg)	Otros usos de suelo (mg/kg)	VR90 (mg/kg)
Antimonio	80 <sup>b</sup>	8 <sup>b</sup>	0,8	0,48
Arsénico	40	24 <sup>a</sup>	24 <sup>a</sup>	24
Cadmio	300 <sup>b</sup>	30 <sup>b</sup>	3	0,22
Cobalto	1500 <sup>b</sup>	150 <sup>b</sup>	15	12
Cobre	8000 <sup>b</sup>	800 <sup>b</sup>	80	20
Cromo total	2300 <sup>b</sup>	230	90	32
Manganeso	33900 <sup>b</sup>	3390	690 <sup>a</sup>	690
Mercurio	15	7	5	0,065
Molibdeno	1500 <sup>b</sup>	150 <sup>b</sup>	15	0,7
Níquel	15600 <sup>b</sup>	1560	405	21
Plata	500 <sup>b</sup>	50 <sup>b</sup>	5	0,12
Plomo	2700 <sup>b</sup>	270	75	30
Talio	30 <sup>b</sup>	3	2	0,39
Vanadio	3700 <sup>b</sup>	370 <sup>b</sup>	37 <sup>a</sup>	37
Zinc	100000 <sup>c</sup>	11700 <sup>b</sup>	1170	73

<sup>a</sup>VR90 del elemento; <sup>b</sup>En aplicación del criterio de contigüidad; <sup>c</sup>En aplicación del criterio de reducción.

### 1.7. LEGISLACIÓN MEDIOAMBIENTAL EN AGUAS

#### 1.7.1. Legislación europea

Cronológicamente, la legislación más relevante referente al agua en la Unión Europea es la siguiente:

- Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro (DOUEL 372, de 27 de diciembre de 2006).
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000 (DOCE nº L327, de 22 de diciembre de 2000), que regula el marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, para la protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas, tratando de unificar y refundir buena parte de la normativa existente en esos ámbitos.

Se trata de la Directiva Marco del Agua, traspuesta al marco legislativo estatal a través de la Ley 62/2003, de 30 de Diciembre, de medidas fiscales, administrativas y del orden social (BOE 313, de 31 de diciembre de 2003), modificando el Texto Refundido de la Ley de Aguas.

Esta directiva establece el principio fundamental de que “el agua es un patrimonio a proteger, no un bien comercial” y establece una serie de indicadores de calidad para la clasificación del estado ecológico y químico de las aguas superficiales.

- Directiva 98/83/CE del Consejo, de 3 de noviembre de 1998 (DOCE nº L330, de 5 de diciembre de 1998), relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Tiene como objeto la protección de la salud de las personas de los efectos adversos derivados de cualquier tipo de contaminación, garantizando su salubridad y limpieza, definiendo aguas destinadas al consumo humano como:
  - a) todas las aguas, en su estado original o después de tratamiento, para beber, cocinar, preparar alimentos u otros usos domésticos, independientemente del origen y del suministro;
  - b) todas las aguas usadas en empresas alimentarias para fabricación, tratamiento, conservación o comercialización de productos o sustancias destinadas al consumo humano.

No se aplica a las aguas minerales naturales ni a las aguas medicinales. Los Estados miembros dispondrán su no aplicación cuando las aguas se destinen a usos para los cuales la calidad no afecta directa ni indirectamente a la salud y cuando proceden de una fuente de suministro individual, que produzca una media de menos de 10 cm<sup>3</sup>/día o que abastezca a menos de 50 personas. En este último caso, informarán de ello a la población afectada y de cualquier medida de protección en caso de contaminación o peligro potencial.

Los requisitos mínimos de esta Directiva establecen que las aguas destinadas al consumo humano son salubres y limpias cuando:

- 1- no contienen ningún microorganismo, parásito o sustancia en cantidad o concentración que suponga peligro para la salud.
- 2- cumplan los requisitos mínimos especificados para parámetros microbiológicos y químicos.
- 3- se adopten todas las demás medidas necesarias para garantizar los requisitos de la directiva.

En cuanto a las normas de calidad, los estados establecerán los valores aplicables a las aguas destinadas al consumo humano para los parámetros microbiológicos y químicos. Los parámetros indicadores sólo se fijan a efectos de control. También se fijan valores para nuevos parámetros en caso de exigencia para la protección salud. Los valores establecidos deberán cumplirse para aguas suministradas a través de la red de distribución o a partir de cisterna, para aguas envasadas y para aguas usadas por empresas alimentarias.

- Directiva 91/676, de 12 de diciembre de 1991, para la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura, cuyo objetivo es reducir dicha contaminación y actuar preventivamente contra nuevas contaminaciones de dicha clase.
- Directiva 91/271, de 21 de mayo de 1991 (DOUE nº L135), sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, cuyo objetivo es la recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas, y el tratamiento y vertido de las aguas residuales procedentes de determinados sectores industriales.

### 1.7.2. Legislación estatal española

- Real Decreto-Ley 4/2007, de 13 de abril (BOE 90/2007 de 14 de abril), por el que se modifica el texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio (BOE nº 90 de 14 de abril de 2007).
- Real Decreto 1744/2003, de 19 de diciembre (BOE 312, de 30 de diciembre), por el que se modifica el Real Decreto 1074/2002, de 18 de octubre, por el que se regula el proceso de elaboración, circulación y comercio de aguas de bebida envasadas.
- Real Decreto 1074/2002, de 18 Octubre (BOE 259/2002, de 29 de octubre de 2002), refundición en un único texto del RD 1991, de su modificación por el RD 1998 y de las disposiciones relativas a aguas de bebida envasada de la Directiva europea de 1998. Incorpora sólo aquellos aspectos de la Directiva 98 que se refiere a las aguas de bebida envasada como exigencias comunes o como requisitos específicos, representando así, una transposición parcial de la misma.

Tiene carácter básico y como objeto definir a efectos legales “agua de bebida envasada” y fijar, con carácter obligatorio, las normas de manipulación y/o elaboración, circulación, comercio y ordenación jurídica de tales procedimientos.

Es aplicable a las aguas de bebida envasada y a las aguas importadas y obliga todos los industriales, comerciales e importadores. Quedan excluidas las aguas medicinales y las distribuidas por la red de abastecimiento público.

- Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, (BOE 45/2003, de 21 de febrero de 2003), por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Este Real Decreto se elabora en base a la exigencia de la Directiva 98/83/CE, de 3 de noviembre de 1998, de incorporarse la misma al derecho interno español, con la elaboración de un nuevo texto que recoja las especificaciones científicas y técnicas, a escala nacional de criterios de calidad del agua de consumo humano.

Estos criterios se aplicarán a todas las aguas que, independientemente de su origen y del tratamiento de potabilización que reciban, se utilicen en la industria alimentaria o se suministren a través de redes de distribución públicas o privadas, depósitos o cisternas (BOE núm.45, viernes 21 de febrero de 2003). Se fijan parámetros y valores paramétricos a cumplir basados principalmente en las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud.

- Real Decreto 1/2001, de 20 de julio (BOE 176/2001, de 24 de julio de 2001), por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas. Esta norma establece la regulación del dominio público hidráulico, del uso del agua y del ejercicio de las competencias atribuidas al Estado, delimitadas en el artículo 149 de la Constitución.
- Real Decreto 509/1996 de 15 de marzo, (BOE 77/1996 de 29 de marzo de 1996), por el que se desarrolla el Real Decreto Ley 11/1995, de 28 de Diciembre (BOE 312/1995 de 30 de diciembre), de tratamiento de aguas residuales urbanas, completando las normas sobre recogida, depuración y vertido de dichas aguas.
- Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero (BOE 61/1996 de 11 de marzo), de protección aguas contra la contaminación por nitratos de fuentes agrarias. Se establecen las medidas necesarias para prevenir y corregir la contaminación de las aguas continentales y litorales,

causada por los nitratos de origen agrario.

- Real Decreto 1138/1990, de 14 de septiembre (BOE 226/1990 de 20 de septiembre), por el que se regulan los requisitos sanitarios exigibles a las aguas potables de consumo público. El Ministerio de Sanidad y Consumo establece un sistema de información para la coordinación entre la Administración Sanitaria del Estado y las Comunidades Autónomas. Este Real Decreto obliga a todas las empresas proveedoras y/o distribuidoras de aguas para consumo público. No se aplica a las aguas de bebida envasada ni a las aguas medicinales.

Define “agua potable” a aquellas cuyos caracteres cumplen lo especificado en el presente Real Decreto y “agua potable para consumo público” al agua potable usada para este fin, cualquiera que sea su origen, en estado natural o tras un tratamiento adecuado, destinadas a consumo directo o uso en industria alimentaria para la fabricación, tratamiento, conservación o comercialización de productos destinados al consumo humano y que afecten a la salubridad del producto final.

### 1.7.3. Legislación de la Comunidad Autónoma de Madrid

- Ley 10/1993, de 26 de octubre, sobre vertidos industriales al sistema integral de saneamiento (BOCM 269, 12 de noviembre de 1993).
- Ley 7/1990, de 28 de junio, de protección de embalses y zonas húmedas (BOCM 163, de 11 de julio de 1990).
- Ley 17/1984, de 20 de diciembre, reguladora del abastecimiento y saneamiento de agua de la Comunidad de Madrid (BOCM 311, de 31 de diciembre de 1984). Corrección de errores (BOCM de 28 de marzo de 1985).



---

**BIBLIOGRAFÍA**

- Adriano, D.C., 2001. Trace Elements in terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability and Risk of Metals. Springer-Verlag, New York, USA.
- Aznar, J.M.; Díaz Molina, M.; Pérez González, A.; Gallardo, J.; Portero, J.M.; Aguilar, M.J. y Leal, M.C. (1990). Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Hoja núm. 535 (Algete). IGME.
- Bellido, F.; Capote, R.; Casquet, C.; Navidad, M.; Peinado, M y Villaseca, C. (1981). Caracteres generales del cinturón hercínico en el sector Oriental del Sistema Central español. Cuad. Geol. Iber., 7, 15-51.
- Bellido, F.; Casquet, C; González Lodeiro, F.; Martín Parra, L.M.; Martínez Salanova, J.; Navidad, M. y Olmo del A. (1987). Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Hoja núm. 509 (Torrelaguna). IGME.
- Bellido, F.; Casquet, C.; Escuder, J.; Klein, E.; Olmo del A.; Navidad, M. y Peinado, M. (1991). Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Hoja núm. 484 (Buitrago de Lozoya). IGME.
- B.O.C.M. nº 311/1984, de 31 de diciembre de 1984: Ley 17/1984, de 20 de diciembre, reguladora del abastecimiento y saneamiento de agua en la Comunidad de Madrid.
- B.O.C.M. nº 163/1990, de 11 de julio de 1990.: Ley 7/1990, de 28 de junio, de Protección de Embalses y zonas húmedas.
- B.O.C.M. nº 269/1993, de 12 de noviembre de 1993: Ley 10/1993, de 26 de octubre, sobre vertidos industriales al sistema integral de saneamiento.
- B.O.C.M. nº 280/1999, de 25 de octubre de 1999 y dos de diciembre de 1999: Real Decreto 326/1999, sobre régimen jurídico de suelos contaminados de la Comunidad de Madrid.
- B.O.C.M. nº 283/2001, de 28 de noviembre de 2001: Plan Regional de actuaciones en materia de suelos contaminados de la Comunidad de Madrid.
- B.O.C.M. nº 76/2003, de 31 de marzo: Ley 5/2003, de 20 de marzo de 2003, de Residuos de la Comunidad de Madrid.
- B.O.E. nº 120/1986, de 20 de mayo de 1986: Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- B.O.E. nº226/1990, de 20 de septiembre de 1990: Real Decreto 1138/1990, de 14 de septiembre, por el que se aprueba la Reglamentación Técnico- Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público.
- B.O.E. nº 114/1995, de 13 de mayo de 2005, sobre medidas de regularización y control de vertidos.
- B.O.E. nº 312/1995, de 30 de diciembre de 1995, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas.
- B.O.E. nº 61/1996, de 11 de marzo de 1996: Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, de protección de aguas contra la contaminación por nitratos de fuentes agrarias.
- B.O.E. nº 77/1996, de 29 de marzo de 1996: Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, por el que se desarrolla el Real Decreto Ley 11/1995 (B.O.E. nº 312/1995, de 30 de diciembre), de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas.
- B.O.E. nº 96/1998, de 22 de abril: Ley 10/98, de 21 de abril, de Residuos.
- B.O.E. nº 176/2001: Real Decreto 1/2001, de 20 de julio de 2001, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas.
- B.O.E. 259/2002, de 29 de octubre de 2002, por el que se regula el proceso de elaboración, circulación y comercio de aguas de bebida envasadas
- B.O.E. 312/2002, de 30 de diciembre de 2002: Real Decreto 1744/2003 por el que se modifica el Real Decreto 1074/2002, de 18 de octubre, por el que se regula el proceso de elaboración, circulación y comercio de aguas de bebida envasadas.
- B.O.E. nº 45/2003, de 21 de febrero de 2003: Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- B.O.E. nº 312/2003, de 30 de diciembre de 2003: Real Decreto 1744/2003, de 19 de diciembre, por el que se modifica el Real Decreto 1074/2002, de 18 de octubre (B.O.E. 259/2002, de 29 de octubre de 2002) por el que se regula el proceso de elaboración, circulación y comercio de aguas de bebida envasadas.
- B.O.E. nº 313/2003, de 31 de diciembre de 2003: Ley 62/2003, de 30 de diciembre de 2003, de medidas fiscales, administrativas y del orden social.

- 
- B.O.E. nº 15/2005, de 18 de enero de 2005: Real Decreto 9/2005, de 14 de enero: Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.
  - B.O.E. nº90/2007, de 14 de abril de 2007: Real Decreto-Ley 4/2007, de 13 de abril, por el que se modifica el texto refundido de la Ley de Aguas.
  - Buckman, H.O., and Brady, N.C., 1960. The nature and properties of soils (6th ed.): New York, Mac Millan Co., 567 p.
  - Canadian Environmental Quality Guidelines ( 2003). Canadian Council of Ministres of the Environment (CCME), December, 2003.
  - Cannon, H.L.,1978. *Geochem. Environ.*3, 17.
  - COM (2006) 231 final. Communication from the Comisión to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Thematic Strategy for Soil Protection. Brussels, 22.9.2006.
  - COM (2006) 232 final. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the council establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC. Brussels, 22.9.2006.
  - CSIC (1990), Mapa de Asociaciones de Suelos de la Comunidad de Madrid Escala 1:200.000. Consejería de Agricultura y Cooperación. M-27127-1990. 1ª edición.
  - Custodio, E y Llamas, M.R., 1983. Hidrogeología subterránea. Segunda Edición. Tomo I, pág.203.
  - Custodio, E y Llamas, M.R., 1983. Hidrogeología subterránea. Segunda Edición. Tomo II, pág.1884.
  - Real Decreto 326/1999, de 18 de Noviembre, por el que se regula el régimen jurídico de los suelos contaminados de la Comunidad de Madrid.
  - Díaz de Neira, A.; Cabra, P.; Hernaiz Huerta, P.P. y López Olmedo, F. (1993). Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Hoja núm. 534 (Colmenar Viejo). IGME.
  - Directiva del Consejo de la Unión Europea 86/278/CEE, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura. p:L181/6-L181/9
  - Directiva 91/271, de 21 de mayo de 1991, sobre tratamiento de aguas residuales urbanas.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Directiva 91/676, de 12 de diciembre de 1991, para la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en agricultura.
- Directiva 2000/60/CE, de 23 de octubre de 2000: Marco comunitario de actuación en política de aguas.
- Directiva 98/83/CE del Consejo, de 3 de noviembre de 2003, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.
- Directiva 2004/35/CE of the European Parliament and the Council of 21 April 2004 on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage.
- Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro (DOUE L 372, de 27 de diciembre de 2006).
- Drever, J.I. (1997). The geochemistry of natural waters. Prentice Hall, Third edition, 436 pp.
- FAO, 1970. Guía para la descripción de perfiles de suelo. Roma, 1989.
- Fergusson, J.E., 1990. The Heavy Elements. Chemistry, Environmental Impact and Health Effects. Pergamon Press plc. UK.
- Föstner, U. 1998. Integrated Pollution Control. Ed. Weissbach, A. Boeddicker, H. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Hernaiz Huerta, P.P.; López Olmedo, F.; Cabra, P.; Solé, J.; Escuder, J. y Valverde, P. (en prensa). Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Hoja núm. 459 (Tamajón). IGME.
- IHOBE, 1994.
- ITGE (1988). Atlas Geocientífico del Medio Natural de la Comunidad de Madrid. I.S.B.N. 84-404-1843-4.
- Karlen, D.L.; Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. y Schuman, G.E.. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. Soil Science Society of America H.61:4-10.
- Knox, A.S., Gamerdinger, A.P., Adriano, A.P., Kolka, D.C., Kaplan, D.I., 1999. Am.Soc. Agron.
- Lindsay, W.L., 1972. In J.J. Mortvedt, P.M. Giordano, and W.L.Lindsay, eds. *Micronutrients in agriculture*, 41-57. Soil Sci Soc Am Inc, Madison, WI.
- Morel, F.M.M. and Hering, J. G. (1993). Principles and applications of aquatic chemistry. Wiley-Interscience Publication. John Wiley&Sons, Inc., 374p.

- NDGC, 2006: U.S. National Geophysical Data Center. Topographical map of Spain. Author: Bas de Jong Sources. The Times Atlas of the World. 11 th ed. London: Times Books, 2005. Spain. Encyclopaedia Británica from Encyclopaedia Británica Online.
- Olivé, A.; Pérez González, A.; Gallardo, J.; Díaz Molina, M.; Portero, J.M. y Aguilar, M.J. (1990). Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Hoja núm. 510 (Marchamalo). IGME.
- Patterson, W.J., Passino, R., 1987. Metals Speciation, Separation and Recovery. Lewis Publishers, INC, Chelsea. UK.
- Pedraza, J. (1994). El Sistema Central. En: Gutiérrez Elorza, M. (Ed.): Geomorfología de España. Editorial Rueda, 63-100.
- Pérez González, A. (1994). La depresión del Tajo. En Gutierrez Elorza, M. (Ed.): Geomorfología de España. Editorial Rueda, 389-436.
- Pérez González, A. y Gallardo, J. (1987). La Raña al sur de Somosierra y Sierra de Ayllón: un piedemonte escalonado del Villafranquiense medio. Geogaceta, 2, 29-32.
- Pérez Regodón, J., 1970. Guía geológica, hidrogeológica y minera de la provincia de Madrid. Memoria del Instituto Geológico y Minero de España, tomo 76, Madrid.
- Polemio, M., Bufo, S.A., Senesi, N., 1982. Plant Soil, 69,57.
- Portero, J.M.; Díaz Molina, M.; González Lodeiro, F.; Pérez González, A.; Gallardo, J.; Aguilar, M.J. y Leal, M.C. (1990). Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Hoja núm. 485 (Valdepeñas de la Sierra). IGME.
- Prado, C., 1864. Descripción física y geológica de la provincia de Madrid. Junta General de Estadística. Madrid.
- Rivas-Martínez, S., Fernández González, F., Sánchez Mata, D. & Pizarro, J.M., 1990. Vegetación de la Sierra de Guadarrama. Guía geobotánica de la Excursión de las II Jornadas de Taxonomía Vegetal (Madrid, 27-V-1990). Itinera Geobot. 4:3-132.
- Royo y Gómez, J. y Menéndez Puget, L., 1929. Mapa Geológico de España, a escala 1:50.000. Hoja nº 559, Madrid. IGME.
- Salomons, W., Förstner, U., 1995. Heavy Metals: Problems and Solutions. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, Alemania.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- SEC(2006)620. Commission staff working document accompanying the Communication from the Comisión to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Thematic Strategy for Soil Protection. Impact Assessment of the Thematic Strategy on Soil Protection. Brussels, 22.9.2006
- SEC(2006)1165. Comisión staff working document accompanying the Communication from the Comisión to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Thematic Strategy for Soil Protection. Summary of the impact assessment.
- Vázquez, I., 1999. Memoria de Licenciatura "Niveles de fondo y valores de referencia de elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid desarrollados sobre material granítico y calizo.
- VROM (1996, 1998). Soil Protection Act. Directorate-General for Environmental Protection, Department of Soil Protection, Ministry of Housing, Spatial Planning, and the Environment. The Hague, Netherlands.
- White, D. E., 1957. Magmatic, connate, and metamorphic waters: Geol. Soc. America Bull, v. 68, p. 1659-1682.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. LOCALIZACIÓN DE LAS MUESTRAS**

#### **2.1.1. Toma de muestras**

La toma de muestras busca reducir la masa total del material objeto de estudio a una porción representativa del material total, de manera que los resultados analíticos se relacionen con los de este último. Consecuentemente, el muestreo debe hacerse según la muestra y el problema analítico objeto de estudio.

Con el fin de reducir el error introducido en la toma de muestra, se debe seguir una estrategia adecuada de muestreo. En el caso de estudios medioambientales en los que se trata de predecir el comportamiento de contaminantes, la estrategia que se suele aplicar es la no probabilística (también conocida como selectiva o dirigida) basada en el juicio del analista y en función de parámetros como accesibilidad, eficiencia, coste, etc.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

La recomendación bibliográfica para la estrategia de muestreo en zonas limpias (NEN 5740) indica que ésta debe seguir un modelo aleatorio, puesto que la hipótesis de no contaminación presupone una distribución homogénea de los elementos en el suelo.

Así, en el caso de contaminación de suelos, es la capa superficial del suelo la que ofrece mayores posibilidades de exposición a la contaminación, de ahí que la cantidad de muestra tomada en este estudio se extienda desde la superficie hasta una profundidad de 0,2 m. Con el fin de relacionar el nivel de referencia de las muestras tomadas con el nivel de fondo o litológico, se han tomado también muestras de rocas incluidas y/o superficiales de la zona.

En el caso de las muestras de agua, la muestra debe ser homogénea y representativa. La toma y conservación de muestras de aguas se lleva a cabo según la naturaleza de los analitos a determinar.

Para análisis de cationes y aniones se utilizó un envase de plástico de 1 litro de capacidad sin tratar. En el momento de la toma, se efectuaron varios enjuagues con el mismo agua a analizar y posteriormente fueron llenados completamente. La botella se sumergió a una cierta distancia de la orilla del río. Se conservaron refrigeradas a temperatura  $< 4^{\circ}\text{C}$  una vez en el laboratorio hasta su análisis. En el caso de análisis de metales se acidularon con ácido nítrico a  $\text{pH} < 2$ .

Para la determinación de compuestos orgánicos, las muestras se recogieron en envases de cristal de 1 litro de capacidad y color ámbar (fotosensibilidad de los analitos) con tapón de rosca recubierta interiormente por una lámina de teflón. Se ajustó el pH de todas las muestras a un pH inferior a 2 en el momento de la recogida, añadiendo HCl, con objeto de retardar la degradación microbiológica. Una vez recogidas, se conservaron a temperaturas inferiores a  $4^{\circ}\text{C}$  hasta el momento del análisis. Se tomó la precaución de que el área de almacenamiento estuviese libre de vapores de disolventes orgánicos o de luz intensa directa.

### 2.1.2. Secuencia de muestreo

Se llevaron a cabo dos fases de muestreo en muestras sólidas y 3 fases de muestreo en muestras acuosas. Los puntos de muestreo se trataron de disponer siguiendo el cauce fluvial del Jarama, a partir de la hoja 1 de Colmenar Viejo y la hoja 3 de Madrid (Mapa de la Comunidad de Madrid, a escala 1:100.000. Fuente: Consejería de Política Territorial. Servicio Cartográfico Regional).



En la primera fase de muestreo, se tomaron muestras de suelos desarrollados a partir de las principales litologías o formaciones en 15 localidades, así como de aguas pertenecientes al Jarama y/o sus afluentes.

La segunda fase de muestreo, complementaria a la anterior, consistió en la toma de muestras en otras 5 localidades diferentes. Parte de las muestras se recogieron sobre tipos de suelos ya muestreados y otras sobre suelos desarrollados a partir de litologías menos representativas de la variedad litológica del ámbito geográfico objeto de estudio.

En el primer muestreo, se recogieron un total de 58 muestras: 51 muestras sólidas, básicamente a dos profundidades: de 0 a 10 cm y de 10 a 20 cm, junto con rocas incluidas y/o superficiales, y 7 muestras acuosas. En el segundo muestreo se recogieron un total de 17 muestras: 14 muestras sólidas y 3 muestras acuosas.

La tercera fase de muestreo de muestras acuosas se llevó a cabo con el fin de ampliar el estudio físico-químico realizado con el estudio de compuestos orgánicos, así como comparar los resultados obtenidos correspondientes a dos estaciones del año diferentes (primavera y otoño). Se pudieron muestrear 7 puntos de las muestras de agua tomadas en la primera fase, junto con un nuevo punto de muestreo (IVG-1).

El número total de muestras sólidas y acuosas analizadas es de 83.

La nomenclatura utilizada para muestras sólidas en el primer muestreo es IV y para el segundo muestreo es IG. En el caso de muestras acuosas se consideraron las 10 muestras tomadas en primavera como primer muestreo (IV+IG) y las 8 muestras tomadas en otoño como segundo muestreo.

La situación de los puntos de muestreo figura en el Mapa Geológico Regional adjunto.

# MAPA GEOLOGICO REGIONAL

## LEYENDA

### BASAMENTO

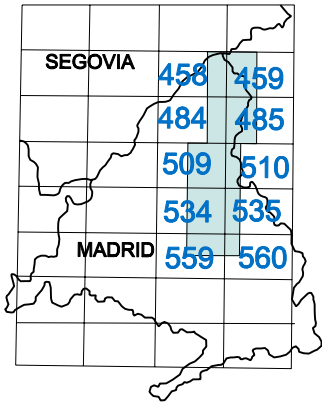
- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| 1 Rocas filonianas                  | 6 Neises pelíticos preordovícicos                |
| 2 Granitos variscos y prevariscos   | 7 Esquistos y cuarcitas Ordovícico inferior      |
| 3 Metabasitas y neises prevariscos  | 8 Cuarcita armoricana Ordovícico inferior        |
| 4 Neises prevariscos                | 9 Pizarras y areniscas Ordovícico medio-superior |
| 5 Neises y esquistos preordovícicos |  |

### COBERTERA ALPINA

- |  |   |
|--|---|
| 10 Areniscas y lutitas Permotriásico                           | 15 Arenas arcósicas, gravas y lutitas. Neógeno                                  |
| 11 Arenas, areniscas y lutitas Cretácico superior              | 16 Ortoconglomerados silíceos (rañas) Plioceno                                  |
| 12 Areniscas y margocalizas Cretácico superior                 | 17 Arenas, gravas y limos (terrazas) Plioceno-Pleistoceno                       |
| 13 Calizas y dolomías Cretácico superior                       | 18 Gravas, arenas y limos con clastos (conos y coluviones) Pleistoceno-Holoceno |
| 14 Brechas, yesos y lutitas rojas Cretácico superior-Paleógeno | 19 Gravas, arenas y limos (aluviones) Holoceno                                  |

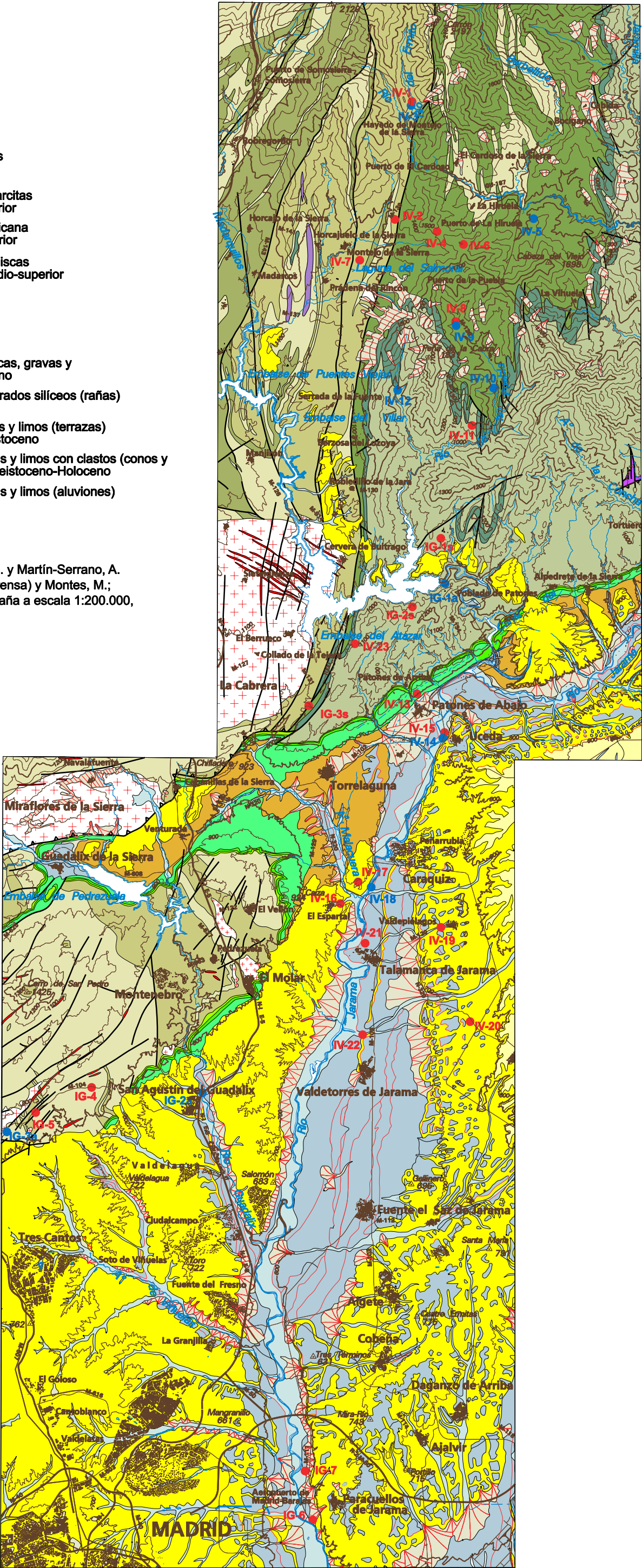
Cartografía basada en: Rubio, F.; López, F.; Nozal, F.; Montes, M.; Bernat, M. y Martín-Serrano, A. ( Mapa Geológico de España a escala 1:200.000; Hoja nº 39, Segovia, en prensa) y Montes, M.; Rubio, F.; López, F.; Nozal, F. y Martín-Serrano, A. ( Mapa Geológico de España a escala 1:200.000, Hoja nº 45, Madrid, en prensa).

### ESQUEMA DE SITUACIÓN



### MUESTRAS

- |  |  |
|--|--|
| ● Suelo  | ● Agua   |
| IV-1 Hayedo de Montejo                             | IV-3 Hayedo de Montejo; río Jarama                 |
| IV-2 Ctra. Montejo-Cardoso M-139, Km. 3            | IV-5 La Morra (Prádena del Rincón) río Jarama      |
| IV-4 Puerto de La Hiruela                          | IV-9 Puerto de La Puebla; agua de escorrentía      |
| IV-6 La Hiruela                                    | IV-10 Tejera Parque Avellanos; arroyo de La Puebla |
| IV-7 Prádena del Rincón                            | IV-12 Reserva Nacional; río Riato                  |
| IV-8 Puerto de La Puebla                           | IV-14 Cercano a Uceda; río Jarama                  |
| IV-11 Los Cerrajos                                 | IV-18 Talamanca del Jarama; río Jarama             |
| IV-13 Patones de Abajo                             | IG-1a El Atazar; agua de escorrentía               |
| IV-15 Granja Uceda                                 | IG-2a San Agustín de Guadalix; río Guadalix        |
| IV-16 El Espartal                                  | IG-3a Colmenar Viejo; Arroyo Tejada                |
| IV-17 Talamanca del Jarama                         |  |
| IV-19 Valdepiélagos                                |  |
| IV-20 Casar de Talamanca                           |  |
| IV-21 Talamanca del Jarama                         |  |
| IV-22 Matabueyes                                   |  |
| IV-23 Las Chozas ( El Atazar )                     |  |
| IG-1s El Atazar                                    |  |
| IG-2s Poblado de la Presa del Atazar               |  |
| IG-3s Berruenco-Torrelaguna                        |  |
| IG-4 San Agustín Guadalix-Colmenar Viejo ( M-606 ) |  |
| IG-5 San Agustín Guadalix-Colmenar Viejo ( M-606 ) |  |
| IG-6 Paracuellos del Jarama                        |  |
| IG-7 Paracuellos del Jarama                        |  |





### 2.2. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELOS Y AGUAS

#### 2.2.1. Información acerca de los puntos de muestreo:

**Número de muestra: IV-1**



Perfil IV-1

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990: Cambisol. Asociación CM-13: Cambisol húmico, Leptosol úmbrico, Leptosol lítico, Leptosol dístrico. Litología: neises.
  - FAO, 2006: Leptosol dístrico.
- b) Fecha de observación: 17/04/2002
- c) Ubicación: Hayedo de Montejo
- d) Altitud: 1250-1600 m
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: ladera.
  - Topografía del terreno circundante: montañosa.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: inclinada.
- g) Vegetación o uso de la tierra: Pino silvestre y haya.
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: Esquisto y neis.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

### Número de muestra: IV-2



Perfil IV-2



Alrededores del perfil IV-2

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990: Cambisol. Asociación CM-9: Cambisol dístico, leptosol lítico, Cambisol húmico. Litología: pizarras.
  - FAO, 2006: Cambisol dístico.
- b) Fecha de observación: 17/04/2002
- c) Ubicación: Carretera Montejo a Cardoso M-139, km.3. Cercano al Camping "La Dehesilla".
- d) Altitud: 1250-1600 m
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: ladera.
  - Topografía del terreno circundante: montañosa.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: suavemente inclinada.
- g) Vegetación o uso de la tierra: Robledal
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: pizarra, neis y cuarcita.

### Número de muestra: IV-4



Perfil IV-4

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990:
    - Leptosol. Asociación LP-15: Leptosol lítico. Litología: pizarras.
    - Cambisol. Asociación CM-6: Cambisol dístico. Litología: pizarras.
  - FAO, 2006: Leptosol dístico.
- b) Fecha de observación: 25/04/2002
- c) Ubicación: Puerto de la Hiruela. Carretera M-137.
- d) Altitud: 1478 m
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: ladera.
  - Topografía del terreno circundante: montañosa.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: escarpada.
- g) Vegetación o uso de la tierra: Robledal
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: pizarra y cuarcita.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

Número de muestra: IV-6



Perfil IV-6



Localización del perfil IV-6

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990: Cambisol. Asociación CM-6: Cambisol dístico. Litología: pizarras.
  - FAO, 2006: Cambisol dístico.
- b) Fecha de observación: 25/04/2002
- c) Ubicación: Carretera M-137 a La Hiruela.
- d) Altitud: 1257 m
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: ladera.
  - Topografía del terreno circundante: montañosa.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: escarpada.
- g) Vegetación o uso de la tierra: matorral de jara.
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: neis, pizarra y cuarzo.

### Número de muestra: IV-7



Perfil IV-7



Alrededores del perfil IV-7

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990: Cambisol. Asociación CM-15: Cambisol húmico, dístrico y leptosol úmbrico. Litología: neises.
  - FAO, 2006: Cambisol eutricto.
- b) Fecha de observación: 25/04/2002
- c) Ubicación: Carretera M-130 a Prádena del Rincón.
- d) Altitud: 1104 m
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: rampa.
  - Topografía del terreno circundante:
- f) Pendiente donde está el perfil situado: plano o casi plano.
- g) Vegetación o uso de la tierra: Robledal
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: neis y cuarcita.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

### Número de muestra: IV-8



Perfil IV-8



Alrededores del perfil IV-8

a) Clasificación:

- CSIC, 1990: Cambisol. Asociación CM-6: Cambisol dístico. Litología: pizarras.
- FAO, 2006: Cambisol dístico.

b) Fecha de observación: 25/04/2002

c) Ubicación: Puerto de la Puebla (Carretera de Prádena M-130)

d) Altitud: 1636 m

e) Forma del terreno:

- Posición fisiográfica: ladera.
- Topografía del terreno circundante: montañosa.

f) Pendiente donde está el perfil situado: escarpada.

g) Vegetación o uso de la tierra: Robledal.

h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: pizarra.



### Número de muestra: IV-11



Perfil IV-11



Alrededores y localización del perfil IV-11

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990: Cambisol. Asociación CM-9: Cambisol dístico, Leptosol lítico, Cambisol húmico. Litología: pizarras.
  - FAO, 2006: Cambisol húmico.
- b) Fecha de observación: 25/04/2002
- c) Ubicación: Los Cerrajos. Carretera de Prádena M-130, km 9.
- d) Altitud: 1636 m
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: ladera.
  - Topografía del terreno circundante: montañosa.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: ligeramente inclinada.
- g) Vegetación o uso de la tierra: matorral de jara.
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: pizarra.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

### Número de muestra: IV-13



Perfil IV-13, alrededores y localización del perfil.

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990:
    - Leptosol. Asociación LP-11: Leptosol móllico, rendsínico y lítico. Litología: limos y cantos calcáreos (coluviones).
  - FAO, 2006: Leptosol calcárico.
- b) Fecha de observación: 26/04/2002
- c) Ubicación: Patones de Abajo (M-128).
- d) Altitud: 834 m
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: relieve estructural mesozoico.
  - Topografía del terreno circundante: falda.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: ligeramente inclinado.
- g) Vegetación o uso de la tierra: matorral de jara, retama.
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: caliza.



### Número de muestra: IV-15



Localización del perfil IV-15.

a) Clasificación:

- CSIC, 1990:
  - Regosol. Asociación RG-10: Regosol districo, eútrico, luvisol háplico y calcisol háplico. Litología: arenas y cantos silicios (coluviones).
  - Fluvisol. Asociación FL-1: Fluvisol eútrico, Cambisol gleico, Fluvisol calcárico. Litología: gravas, arenas, limos y arcillas (Terrazas).
- FAO, 2006: Regosol calcárico.

b) Fecha de observación: 26/04/2002

c) Ubicación: Carretera M-102 a Uceda.

d) Altitud: 915 m

e) Forma del terreno:

- Posición fisiográfica: vega.
- Topografía del terreno circundante: valle.

f) Pendiente donde está el perfil situado: plano o casi plano.

g) Vegetación o uso de la tierra:

h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: caliza.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

Número de muestra: IV-16



Perfil IV-6



Alrededor del perfil IV-16



Alrededor del perfil IV-16

a) Clasificación:

- CSIC, 1990: Luvisol. Asociación LV-15: Luvisol háplico, calcisol háplico y leptosol eútrico. Litologías: gravas, arenas, limos y arcillas (Terrazas); arcosas, arcillas y yesos.
- FAO, 2006: Regosol calcárico.

b) Fecha de observación: 26/04/2002

c) Ubicación: M-122 a El Espartal

d) Altitud: 720 m

e) Forma del terreno:

- Posición fisiográfica: vertiente (cerros)
- Topografía del terreno circundante: valle.

f) Pendiente donde está el perfil situado: plano o casi plano.

g) Vegetación o uso de la tierra: pastizal.

h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: No



### Número de muestra: IV-17



Perfil IV-17



Alrededores del perfil IV-17

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990: Luvisol. Asociación LV-15: Luvisol háplico, calcisol háplico y leptosol eútrico. Litologías: gravas, arenas, limos y arcillas (Terrazas); arcosas, arcillas y yesos.
  - FAO, 2006: Regosol calcárico.
- b) Fecha de observación: 26/04/2002
- c) Ubicación: Llano de los Frailes (M-320 Talamanca de Jarama)
- d) Altitud: 645 m
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: vega.
  - Topografía del terreno circundante: valle.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: suavemente inclinado.
- g) Vegetación o uso de la tierra: retamal.
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: caliza y grava.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

Número de muestra: IV-19



Perfil IV-19



Alrededores del perfil IV-19.

a) Clasificación:

- CSIC, 1990: Luvisol. Asociación LV-12: Luvisol gleico, luvisol cálcico. Litologías: arcosas y gravas, arenas, limos y arcillas (Terrazas).
- FAO, 2006: Regosol eutríco.

b) Fecha de observación: 26/04/2002

c) Ubicación: Valdepiélagos (M-120)

d) Altitud: 744 m

e) Forma del terreno:

- Posición fisiográfica: vertiente (cerro).
- Topografía del terreno circundante: valle.

f) Pendiente donde está el perfil situado: plano.

g) Vegetación o uso de la tierra: Cultivo gramíneas.

h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: No.



### Número de muestra: IV-20



Perfil IV-20



Alrededores del perfil IV-20

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990: Luvisol. Asociación LV-12Luvisol gleico, luvisol cálcico. Litologías: arcosas y gravas, arenas, limos y arcillas (Terrazas).
  - FAO, 2006: Luvisol ántrico.
- b) Fecha de observación: 26/04/2002
- c) Ubicación: N-320 al Casar de Talamanca
- d) Altitud: 831 m
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: vertiente (cerro).
  - Topografía del terreno circundante: valle.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: plano
- g) Vegetación o uso de la tierra: Cultivo gramíneas.
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: No

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

Número de muestra: IV-21



Perfil IV-21



Alrededores del perfil IV-21

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990: Luvisol. Asociación LV-13: Luvisol háplico. Litología: arcosas.
  - FAO, 2006: Luvisol ántrico.
- b) Fecha de observación: 26/04/2002
- c) Ubicación: La Presa (Talamanca de Jarama)
- d) Altitud: 645 m
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: vega.
  - Topografía del terreno circundante: valle.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: plano.
- g) Vegetación o uso de la tierra: Cultivo gramíneas.
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: No



### Número de muestra: IV-22



Alrededores del perfil IV-22.



Perfil IV-22

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990: Luvisol. Asociación LV-13: Luvisol háplico. Litología: arcosas.
  - FAO, 2006: Cambisol eutricto.
- b) Fecha de observación: 26/04/2002
- c) Ubicación: Matabueyes (M-103)
- d) Altitud: 660 m
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: vega.
  - Topografía del terreno circundante: valle.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: suavemente inclinado.
- g) Vegetación o uso de la tierra: Cultivo- frondosas
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: No

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

### Número de muestra: IV-23

a) Clasificación:

- CSIC, 1990: Cambisol. Asociación CM-9: Cambisol districo, Leptosol lítico, Cambisol húmico. Litología: pizarras.
- FAO, 2006: Cambisol húmico.

b) Fecha de observación:

c) Ubicación: Las Chozas (M-133 a El Atazar)

d) Altitud:

e) Forma del terreno:

- Posición fisiográfica: ladera.
- Topografía del terreno circundante: montañosa.

f) Pendiente donde está el perfil situado:

g) Vegetación o uso de la tierra:

h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: pizarra.

### Número de muestra: IG-1s



Alrededores del perfil IG-1s



Perfil IG-1s

#### a) Clasificación:

- CSIC, 1990: Cambisol. Asociación CM-9: Cambisol dístico, Leptosol lítico, Cambisol húmico. Litología: pizarras.
- FAO, 2006: Cambisol dístico.

#### b) Fecha de observación: 20/10/2003

#### c) Ubicación: El Atazar. Carretera a Centro Sport Natura.

#### d) Altitud: 995 m

#### e) Forma del terreno:

- Posición fisiográfica: ladera.
- Topografía del terreno circundante: montañosa.

#### f) Pendiente donde está el perfil situado: ligeramente inclinado.

#### g) Vegetación o uso de la tierra: Jaral, pinar y retamar.

#### h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: pizarra.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

Número de muestra: IG-2s



Perfil IG-2s



Alrededores del perfil IG-2s

a) Clasificación:

- CSIC, 1990: Cambisol. Asociación CM-9: Cambisol districo, Leptosol lítico, Cambisol húmico. Litología: pizarras.
- FAO, 2006: Cambisol húmico.

b) Fecha de observación: 20/10/2003

c) Ubicación: Poblado de la Presa de El Atazar (M-133)

d) Altitud: 704-1009 m

e) Forma del terreno:

- Posición fisiográfica: ladera.
- Topografía del terreno circundante: montañosa.

f) Pendiente donde está el perfil situado: inclinado.

g) Vegetación o uso de la tierra: Pinar

h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: pizarra.

Número de muestra: IG-3s



Perfil IG-3s



Alrededores del perfil IG-3s

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990: Cambisol. Asociación CM-9: Cambisol dístico, Leptosol lítico, Cambisol húmico. Litología: pizarras.
  - FAO, 2006: Cambisol dístico.
- b) Fecha de observación: 20/10/2003
- c) Ubicación: Carretera M-131 Berrueco a Torrelaguna, desvío Los Tomillares.
- d) Altitud:
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: rampa.
  - Topografía del terreno circundante: falda.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: suavemente inclinado.
- g) Vegetación o uso de la tierra: encinar con retama.
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: pizarra.



### Número de muestra: IG-4



Alrededores del perfil IG-4



Perfil IG-4

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990: Cambisol. Asociación CM-11: Cambisol dístico, Cambisol gleico. Litología: neises.
  - FAO, 2006: Regosol eutricto.
- b) Fecha de observación: 20/10/2003
- c) Ubicación: Cañada de Vinatea M-606. N° polígono 37, N° camino 9011.
- d) Altitud:
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: rampa.
  - Topografía del terreno circundante: falda.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: plano o casi plano.
- g) Vegetación o uso de la tierra: Encinar adehesado.
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: neis.

### Número de muestra: IG-5



Alrededores del perfil IG-5



Perfil IG-5

- a) Clasificación:
- CSIC, 1990: Cambisol. Asociación CM-11: Cambisol dístico, Cambisol gleico. Litología: neises.
  - FAO, 2006: Regosol eutricto.
- b) Fecha de observación: 20/10/2003
- c) Ubicación: Cañada de Barajas. M-606 N° polígono 37, N° camino 9010.
- d) Altitud:
- e) Forma del terreno:
- Posición fisiográfica: rampa.
  - Topografía del terreno circundante: falda.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: suavemente inclinado.
- g) Vegetación o uso de la tierra: pastizal.
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: neis.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

Número de muestra: IG-6



Perfil IG-6

- a) Clasificación:
  - CSIC, 1990: Luvisol. Asociación LV-15: Luvisol háplico, calcisol háplico y leptosol eútrico. Litologías: gravas, arenas, limos y arcillas (Terrazas); arcosas, arcillas y yesos.
  - FAO, 2006: Regosol calcárico.
- b) Fecha de observación: 27/10/2003
- c) Ubicación: Paracuellos de Jarama (M-113)
- d) Altitud: 690 m
- e) Forma del terreno:
  - Posición fisiográfica: vega.
  - Topografía del terreno circundante: valle.
- f) Pendiente donde está el perfil situado: plano o casi plano.
- g) Vegetación o uso de la tierra: cultivo gramíneas.
- h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: No.



### Número de muestra: IG-7



Alrededores del perfil IG-7.



Perfil IG-7

#### a) Clasificación:

- CSIC, 1990: Luvisol. Asociación LV-15: Luvisol háplico, calcisol háplico y leptosol eútrico. Litologías: gravas, arenas, limos y arcillas (Terrazas); arcosas, arcillas y yesos.
- FAO, 2006: Regosol eutricto.

#### b) Fecha de observación: 27/10/2003

#### c) Ubicación: Polígono Industrial El Pulido (Paracuellos de Jarama).

#### d) Altitud: 690 m

#### e) Forma del terreno:

- Posición fisiográfica: vega o vertiente.
- Topografía del terreno circundante: valle.

#### f) Pendiente donde está el perfil situado: plano o casi plano.

#### g) Vegetación o uso de la tierra: cultivo gramíneas.

#### h) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: No.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

**Número de muestra: IV-3. Agua del Río Jarama.**



Punto de toma de la muestra de agua IV-3

**Número de muestra: IV-5. Agua del Río Jarama.**



Punto de toma de la muestra de agua IV-5.



**Número de muestra: IV-9. Agua de escorrentía.**



Punto de toma de la muestra de agua IV-9

**Número de muestra: IV-10. Agua Arroyo de la Puebla.**



Punto de toma de la muestra de agua IV-10.

### Número de muestra: IV-12. Agua Río Riato.



Punto de toma de la muestra de agua IV-12.

### Número de muestra: IV-14. Agua del Río Jarama.



Punto de toma de la muestra de agua IV-14



### Número de muestra: IV-18. Agua del Río Jarama.



Muestra agua IV-18



Puente del Jarama.

### Número de muestra: IG-1a. Agua de escorrentía



Punto de toma de la muestra de agua IG-1a



Alrededores de la muestra de agua IG-1a



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

Número de muestra: IG-2a. Agua Río Guadalix.



Punto de toma de la muestra de agua IG-2a



Alrededores de muestra agua IG-2a

Número de muestra: IG-3a. Agua Arroyo Tejada.



Punto de toma de la muestra de agua IG-3a

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.2.2. Información general de las muestras de suelo, roca y agua.

La siguiente tabla muestra una descripción general de las distintas muestras sólidas (horizontes: color blanco; roca: color naranja) y muestras acuosas (color azul).

Tabla 2.1. Datos y características generales de las muestras analizadas.

PERFIL	Prof.(cm)	Color		Adhesividad	Plasticidad	Consistencia		Estructura	Reacción HCl
		Húmedo	Seco			Húmedo	Seco		
IV-1	0-15	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	10YR 4/3 Pardo-pardo oscuro	No adherente	No plástico	Suelto	Blando	Granular fina	NO
	15-30	10YR 3/4 Pardo amarillento oscuro	10YR 4/6 Pardo amarillento oscuro	No adherente	No plástico	Suelto	Suelto	Granular fina	NO
	Esquisto y neis								
IV-2	0-10	10YR 3/3 Pardo oscuro	10YR 6/3 Marrón pálido	Adherente	Muy plástico	Muy friable	Muy duro	Granular	NO
	10-20	10YR 4/6 Pardo amarillento oscuro	10YR 6/4 Pardo amarillento claro	Adherente	Muy plástico	Muy friable	Duro	Granular	NO
	>70	10YR 4/6 Pardo amarillento oscuro	10YR 6/4 Pardo amarillento claro	Adherente	Muy plástico	Muy friable	Muy duro	Granular grumosa	NO
	Pizarra, neis y cuarcita								
IV-3	Agua del Río Jarama (primavera 2002). Tipología: Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub> -NO <sub>3</sub>								
	Agua del Río Jarama (otoño 2004). Tipología: Na-Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>								
IV-4	0-10	7.5YR 3/4 Pardo oscuro	7.5YR 4/4 Pardo-pardo oscuro	Ligeramente	No plástico	Suelto	Suelto	Granular	NO
	10-20	7.5YR 3/4 Pardo oscuro	7.5YR 4/6 Pardo fuerte	Ligeramente	No plástico	Suelto	Suelto-Blando	Granular	NO
	Pizarra y cuarcita.								
IV-5	Agua del Río Jarama (primavera 2002). Tipología: Na-Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> -Cl								
	Agua del Río Jarama (otoño 2004). Tipología: Ca-HCO <sub>3</sub>								
IV-6	0-10	10YR 4/6 Pardo amarillento oscuro	10YR 6/6 Amarillo pardo	Ligeramente	Ligeramente	Muy friable	Blando	Granular	NO
	10-20	10YR 4/6 Pardo amarillento oscuro	10YR 5/8 Pardo amarillento	Ligeramente	Ligeramente	Muy friable	Suelto	Granular muy fina, muy débil. Roca incl.	NO
	Neis, pizarra y cuarzo.								



## 2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

Tabla 2.1. Continuación

PERFIL	Prof.(cm)	Color		Adhesividad	Plasticidad	Consistencia		Estructura	Reacción HCl
		Húmedo	Seco			Húmedo	Seco		
IV-7	0-10	10YR 4/3 Pardo-pardo oscuro	10YR 6/3 Pardo pálido	Ligeramente	Plástico	Muy friable	Blando	Granular	NO
	10-20	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	10YR 6/4 Pardo amarillento suave	Ligeramente	Plástico	Muy friable	Blando	Granular	NO
	Neis y cuarcita								
IV-8	0-10	10YR 3/3 Pardo oscuro	10YR 6/4 Pardo amarillento	Ligeramente	Ligeramente	Muy friable	Blando	Granular	NO
	10-20	10YR 3/3 Pardo oscuro	10YR 5/4 Pardo amarillento	Ligeramente	Muy plástico	Muy friable	Blando	Granular	NO
	Pizarra								
IV-9	Agua de deshielo (primavera 2002). Tipología: Na-Ca-Cl								
IV-10	Agua Arroyo de Puebla (primavera 2002). Tipología: Ca-HCO <sub>3</sub>								
	Agua Arroyo de Puebla (otoño 2004). Tipología: Ca-HCO <sub>3</sub>								
IV-11	0-10	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	10YR 4/3 Pardo-pardo oscuro	Ligeramente	Muy plástico	Muy friable	Blando	Granular, muy fina, débil	NO
	10-20	10YR 3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	10YR 5/2 Pardo grisáceo	Ligeramente	Muy plástico	Muy friable	Blando	Granular	NO
	Pizarra								
IV-12	Agua Río Riato (primavera 2002). Tipología: Ca-HCO <sub>3</sub>								
	Agua Río Riato (otoño 2004). Tipología: Ca-HCO <sub>3</sub>								
IV-13	0-10	10YR 4/3 Pardo-pardo oscuro	10YR 5/4 Pardo amarillento	Ligeramente	Ligeramente	Muy friable	Blando	Granular	++++
	10-20	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	10YR 6/3 Pardo pálido	Adherente	Muy plástico	Friable	Blando	Granular	++++
	Caliza								
IV-14	Agua del Río Jarama (primavera 2002). Tipología: Ca-Mg-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>								
	Agua del Río Jarama (otoño 2004). Tipología: Ca-Mg-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>								

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla 2.1. Continuación

PERFIL	Prof.(cm)	Color		Adhesividad	Plasticidad	Consistencia		Estructura	Reacción HCl
		Húmedo	Seco			Húmedo	Seco		
IV-15	0-10	10YR 4/3 Pardo-pardo oscuro	10YR 5/3 Pardo	Ligeramente	No plástico	Muy friable	Lig. Duro	Granular muy fino	+
	10-20	10YR 3/4 Pardo amarillento oscuro	10YR 5/4 Pardo amarillento	Ligeramente	No plástico	Muy friable	Blando	Granular	+
	20-45	10YR 3/4 Pardo amarillento oscuro	10YR 5/3 Pardo	Ligeramente	No plástico	Muy friable	Lig. Duro	Granular	+
	Caliza								
IV-16	0-10	10YR 3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	10YR 4/2 Pardo grisáceo oscuro	Adherente	Muy plástico	Friable	Duro	Granular	+++++
	10-20	10YR 5/3 Pardo	10YR 6/3 Pardo pálido	Adherente	Muy plástico	Friable	Duro	Granular	+++++
IV-17	0-10	10YR 4/3 Pardo-pardo oscuro	10YR 5/3 Pardo	Ligeramente	Muy plástico	Friable	Lig. Duro	Poliédrica	++++
	10-20	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	10YR 5/4 Pardo amarillento	Adherente	Muy plástico	Friable	Duro	Granular poliédrica	++++
	Caliza y grava								
IV-18	Agua del Río Jarama (primavera 2002). Tipología: Ca-Mg-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>								
	Agua del Río Jarama (otoño 2004). Tipología: Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>								
IV-19	0-10	10YR 4/3 Pardo-pardo oscuro	10YR 5/3 Pardo	Adherente	Muy plástico	Friable	Duro	Poliédrica muy fina	NO
	10-20	10YR 3/3 Pardo oscuro	10YR 5/4 Pardo amarillento	Ligeramente	Lig. Plástico	Muy friable	Muy duro	Granular aglomerado	NO
IV-20	0-10	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	10YR 5/4 Pardo amarillento	Adherente	Muy plástico	Muy Firme	Ext. Duro	Poliédrica	NO
	10-20	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	10YR 5/4 Pardo amarillento	Adherente	Muy plástico	Firme	Muy Duro	Poliédrica, gruesa	NO
IV-21	0-10	10YR 4/3 Pardo-pardo oscuro	10YR 6/3 Pardo pálido	Ligeramente	Lig. Plástico	Muy friable	Lig. Duro	Poliédrica en bloques	NO
	10-20	10YR 3/3 Pardo oscuro	10YR 5/3 Pardo	Ligeramente	Lig. Plástico	Friable	Duro	Granular	NO
IV-22	0-10	10YR 3/3 Pardo oscuro	10YR 5/4 Pardo amarillento	Ligeramente	No plástico	Muy friable	Blando	Granular	NO
	10-20	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	10YR 6/4 Pardo amarillento suave	Ligeramente	No plástico	Muy friable	Lig. Duro	Granular	NO

## 2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

Tabla 2.1. Continuación

PERFIL	Prof.(cm)	Color		Adhesividad	Plasticidad	Consistencia		Estructura	Reacción HCl
		Húmedo	Seco			Húmedo	Seco		
IV-23	0-10	10YR 3/3 Pardo oscuro	10YR 5/3 Pardo	Ligeramente	No plástico	Muy friable	Blando	Granular. bloques peq-med-ext. duros	NO
	10-20	10Y3/4 Pardo amarillento oscuro	10YR5/4 Pardo amarillento	Ligeramente	No plástico	Firme-muy firme	Blando	Granular fina, bloques grand. Ext. duros	NO
IG-1s	0-10	10YR 4/4 Pardo amarillento	10YR 6/4 Pardo amarillento suave	Adherente	Muy plástico	Muy friable	Duro	Granular migajosa	NO
	10-20	5YR 4/6 Rojo amarillento	7.5YR 7/8 Amarillo rojizo	Adherente	Muy plástico	Muy friable	Duro	Granular migajosa	NO
IG-1a	Agua afluyente Río Jarama (otoño 2003). Tipología: Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub>								
IG-2s	0-10	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	10YR 5/4 Pardo amarillento	No adherente	No plástico	Extremad. Firme	Extremad. Duro	Laminar fuerte	NO
	10-20	10YR 2/1 negro	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	No adherente	No plástico	Extremad. Firme	Extremad. Duro	Laminar fuerte	NO
IG-2a	Agua Río Guadalix (otoño 2003). Tipología: Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>								
	Agua Río Guadalix (otoño 2004). Tipología: Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>								
IG-3s	0-10	10YR 4/6 Pardo amarillento oscuro	10YR 6/4 Pardo amarillento suave	Adherente	Muy plástico	Muy friable	Lig. duro	Granular fina	NO
	10-20	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	10YR 5/4 Pardo amarillento	Lig. Adherente	Muy plástico	Muy friable	Blando	Granular fina	NO
IG-3a	Agua Arroyo Tejada (otoño 2003). Tipología: Na-Ca-Cl-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>								
IG-4	0-10	10YR 4/3 Pardo	10YR 7/3 Pardo muy pálido	No adherente	No plástico	Extr. Firme	Extrem. Duro	Poliédrica	NO
	10-20	2.5Y 7/3 Amarillo pálido	2.5Y 8/3 Amarillo pálido	No adherente	No plástico	Extrem. Firme	Extremad. Duro	Poliédrica	NO
IG-5	0-10	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	10YR 5/3 Pardo	No adherente	Lig. Plástico	Muy friable	Blando	Granular migajosa	NO
	10-20	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	10YR 6/3 Pardo pálido	No adherente	No plástico	Muy firme	Muy duro	Poliédrica	NO
IG-6	0-10	2.5Y 4/3 Pardo oliva	2.5Y 6/2 Gris pardo suave	Lig. Adherente	Lig. Plástico	Friable	Lig. Duro	Poliédrica	+++
	10-20	2.5Y 4/3 Pardo oliva	2.5Y 6/3 Pardo amarillento suave	Adherente	Muy plástico	Friable	Lig. Duro	Poliédrica	+++
IG-7	0-10	2.5Y 3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	2.5Y 4/2 Pardo grisáceo oscuro	No adherente	No plástico	Suelto	Lig.Duro	Poliédrica	NO
	10-20	2.5Y 3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	2.5Y 5/2 Pardo grisáceo	No adherente	No plástico	Suelto	Lig. Duro	Poliédrica	NO

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

A partir de la información geológica aportada por el Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 las muestras de suelo se han localizado en los siguientes sustratos geológicos (Tabla 2.2) (Hojas nº 459, 484, 485, 509, 510, 534, 535).

Tabla 2.2. Sustratos geológicos correspondientes a las muestras de suelo analizadas.

MUESTRA	SUSTRATO GEOLÓGICO
IV-1	Micaesquistos con metasemitas, amfibolitas y silicatos cálcicos
IV-2	Micaesquistos con metasemitas, amfibolitas y silicatos cálcicos
IV-4	Esquistos, metasemitas y cuarcitas
IV-6	Esquistos, metasemitas y cuarcitas
IV-7	Micaesquistos con metasemitas, amfibolitas y silicatos cálcicos
IV-8	Esquistos, metasemitas y cuarcitas
IV-11	Miembro de alternancias de cuarcitas y pizarras de la formación rodada
IV-13	Formación carbonatada cretácica
IV-15	Terraza baja del Jarama
IV-16	Fondos de valles principales y secundarios
IV-17	Fondos de valles principales y secundarios
IV-19	Arcosas
IV-20	Arcosas
IV-21	Terrazas del Jarama
IV-22	Fondos de valles principales y secundarios
IV-23	Esquistos, metasemitas y cuarcitas
IG-1	Miembro de pizarras negras homogéneas de la formación rodada
IG-2	Miembro de pizarras negras homogéneas de la formación rodada
IG-3	Esquistos y pizarras con cuarcitas. Formación constante.
IG-4	Ortoneises glandulares
IG-5	Ortoneises glandulares
IG-6	Terrazas del Jarama
IG-7	Terrazas del Jarama

### 2.3. MÉTODOS DE ANÁLISIS

#### 2.3.1. Métodos analíticos de caracterización del suelo y agua

Una vez realizada la toma de muestras, éstas se llevaron el mismo día al laboratorio para su preparación y posterior análisis, conservándose las muestras acuosas en cámara frigorífica a 4° C.

##### 2.3.1.1. Análisis físico-químico del suelo

Los análisis llevados a cabo han sido los siguientes:

##### 2.3.1.1.1. Análisis granulométrico

Se ha determinado cuantitativamente por sedimentación, la distribución de tamaños de partículas de suelos finos, con un tamaño desde 0.30 mm hasta 0,001 mm, mediante un analizador Micromeritics SEDIGRAPH 5100.



Analizador Micromeritics SEDIGRAPH.

El sistema Sedigraph 5100 calcula la distribución granulométrica de las partículas mediante la velocidad de caída de las mismas y la cantidad de absorción de rayos X. La velocidad de caída de las partículas, de acuerdo a la ley de Stokes, se utiliza para determinar los puntos de celda de medida bajo los cuales ciertos tamaños de partícula caen.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

---

La absorción de rayos X se usa para determinar el porcentaje total de masa de partículas a diferentes puntos de celda. La distribución de tamaño de partículas es procesada informáticamente.

Se ha seguido el procedimiento interno del laboratorio de mineralurgia del Instituto Geológico y Minero de España, PTE-MI-003 Ed.0.

### 2.3.1.1.2. Color

Se ha determinado el color en húmedo y en seco, según la nomenclatura de “Munsell Soil Color Charts” (1954). La clasificación obtenida se muestra en la tabla 2.1.

### 2.3.1.1.3. pH y conductividad

La disponibilidad de nutrientes en el suelo, capacidad tamponante y, consecuentemente, el destino de contaminantes viene determinado, en gran parte, por el pH del suelo.

Se ha determinado el pH en una suspensión agua:suelo y en cloruro potásico:suelo, en una relación 1:2,5; según el “Método de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo”. Se calibró el pH-metro modelo Metrohm 781, con disoluciones tampón Panreac ST pH = 4.00 (+/-0.02) a 20°C y pH = 7.00 (+/-0.02) a 20°C.

La conductividad eléctrica orienta sobre el contenido en sales disueltas en la solución del suelo. En la misma suspensión agua:suelo (1:2,5) utilizada para medir el pH, se ha medido la conductividad eléctrica a 20°C, mediante un conductímetro Chiron modelo microCM 2201 y una célula con dos electrodos, constituidos por unas láminas de platino de 1 cm de lado, paralelas y separadas 1 cm. Cuando la célula se sumerge en agua queda delimitada una columna de líquido de 1cm<sup>2</sup> de sección y 1 cm de longitud, de la cual se mide la conductancia.

El conductímetro está equipado con una sonda para compensar automáticamente la temperatura, con resolución de 0.1°C. La célula presenta una constante K aproximadamente de 1,0 cm<sup>-1</sup>. La medida se expresa en µS/cm. Para la verificación del conductímetro se utilizó una solución de cloruro potásico, KCl 0.01M, con una conductividad específica de 1271 µS/cm a 20°C (BOE nº 163, 09/07/1987).

#### 2.3.1.1.4. Carbonatos

Un contenido moderado de  $\text{CaCO}_3$  (5-20%) implica un  $\text{pH} > 6,5$  y una menor disponibilidad de los metales, ya que a  $\text{pH}$  neutro o básico se tiende a formar precipitados en forma de óxidos o hidróxidos.

Se ha aplicado el método Gasométrico que mide el anhídrido carbónico desprendido por un determinado peso de muestra, al reaccionar con ácido clorhídrico, según la siguiente ecuación



expresándose el resultado en porcentaje de carbonato cálcico equivalente. Para ello se utilizó el calcímetro de Bernard.

#### 2.3.1.1.5. Materia orgánica

La materia orgánica favorece la formación de complejos y quelatos con metales, gobernando así la solubilidad y bioasimilación de metales pesados.

Se ha determinado el carbono orgánico activo, según el método propuesto por Walkley y Black (1934), manteniéndose los coeficientes habituales de transformación a carbono total y a materia orgánica, propuestos por Van Bemmelen y Walkley.

La materia orgánica del suelo se oxida mediante dicromato potásico, en presencia de ácido sulfúrico concentrado, y posterior valoración del exceso de dicromato no reducido, con sal de Mohr 0.5N, según la siguiente ecuación:



El resultado se expresa en porcentaje de materia orgánica y porcentaje de carbono orgánico total.

#### 2.3.1.1.6. Óxidos de hierro y manganeso

Actúan como secuestradores de metales a través de la coprecipitación, adsorción, intercambio iónico o introducción en la red cristalina. Para su determinación se ha seguido el método Mehra&Jackson (1960) y para su medida se ha utilizado la espectroscopía de absorción atómica.

- Amorfos:

A partir de 0,5 g de suelo, previamente pulverizado en mortero, se han determinado los óxidos de hierro y manganeso mediante adición de 25 ml de reactivo de Tamm (ácido oxálico y oxalato amónico, pH entre 3.2-3.3), agitación durante 1 hora en oscuridad y centrifugación durante 15 minutos, repitiendo el proceso una sola vez. Reunidos los extractos se completa a 100 ml con agua destilada. Se mide por absorción atómica el Fe y el Mn.

La acción del reactivo de Tamm está catalizada por la luz de forma que, en la oscuridad y a temperatura ambiente, se provoca la disolución de los óxidos amorfos dependiendo de la naturaleza y concentración de grupos hidroxilo en superficie.

- Cristalinos:

Al residuo de la extracción anterior, se le añaden 20 ml de disolución 0,3M de citrato sódico más 2,5 ml de disolución 1M de bicarbonato sódico. Tras agitación y calentamiento al baño María, durante 15 min a 80°C, se le añade 0,5 g de ditionito sódico (sólido). Se calienta en estufa a 125°C durante 15 minutos y posteriormente, se añaden 8 ml de solución saturada de cloruro sódico y 5 ml de acetona. Se calienta al baño María hasta precipitación, se enfría y centrifuga 5 minutos. Posteriormente, se lava 3 veces con 3ml de una solución en caliente de citrato sódico 0,3M y bicarbonato sódico 1M en proporción 8:1 en volumen; y de la anterior mezcla tomando 5 partes en volumen con una parte de solución saturada de cloruro sódico. Tras cada lavado se centrifuga de 5 a 7 minutos. Reunidos los extractos se completa a 50 ml con agua destilada. Se mide por absorción atómica el contenido en Fe y Mn.

### 2.3.1.1.7. Contenido en elementos

En el presente estudio, las principales técnicas analíticas para la determinación de analitos a diferentes niveles de concentración han sido: la espectroscopia de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente y la espectrofotometría de absorción atómica (apartado 2.3.1.2.9).

Mediante la técnica de *Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-AES)* se han analizado los elementos traza de acuerdo a los espectros emitidos por átomos libres e iones generados en la fuente de plasma. La generación del plasma se lleva a cabo mediante generadores de radiofrecuencia de estado sólido que operan a 27.12 o 40 MHz.



Las principales ventajas de esta técnica son: su amplio intervalo lineal, bajas interferencias de matriz, análisis multielemental simultáneo o secuencial de diferentes elementos a distintas concentraciones y el relativamente poco volumen de muestra necesario.

Los elementos medidos con esta técnica fueron: Ag, As, Ba, Be, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, La, Mn, Nb, Ni, P, Pb, Sb, Sc, V, W, Y y Zn en mg/kg.

Se han utilizado dos modelos de espectrómetros: Jarrell Ash, modelo ICAP 61 en las muestras del primer muestreo y Varian, modelo Vista MPX en las muestras del segundo muestreo y cuyas características se muestran en la tabla 2.3.



Equipo Jarrell Ash ICAP61



Equipo Varian Vista MPX

Tabla 2.3. Características de espectrómetros utilizados.

Equipo	Sistema óptico	RF	Cámara de nebulización	Nebulizador	Inyector	Modo	Detector
Jarrell Ash	Círculo óptico de Rowland	27.12	Cámara de polipropileno con baffle interno	Neumático de flujo cruzado	Desmontable, de zafiro	Radial (antorcha perpendicular al eje óptico)	Tubos fotomultiplicadores (multicanal)
Varian	Policromador Echelle	40	Cámara de teflón cilíndrica de doble paso para alto contenido en sólidos, tipo Sturman-Masters	De surco en V, tipo Babington modificado	Fijo, de cuarzo.	Axial (antorcha alineada con el eje óptico)	Simultáneo de estado sólido CCD (dispositivo de acoplamiento de carga)

RF: radiofrecuencia

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

---

La calibración de ambos equipos se efectuó mediante patrones multielementales. Con el fin de evitar incompatibilidades químicas e interferencias espectrales, el conjunto de elementos objeto de análisis, se distribuyó en 5 grupos para las muestras sólidas y en dos grupos para las aguas, según se detalla en las tablas 2.4 y 2.5, respectivamente.

Tabla 2.4. Grupos de elementos para muestras sólidas

GRUPO	ELEMENTOS
A	As, Be, Ce, Mn, P, Pb, Zn
B	Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, V, Y
C	Ag, La, Nb, Sb, Sc
D	W
M	Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Ti

Tabla 2.5. Grupos de elementos para muestras líquidas

GRUPO	ELEMENTOS
E	Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn
G	Ag, Ba, Be, Co, Ni, Sb, V

Las líneas de trabajo y concentraciones mínimas determinables (CMD) en muestras sólidas figuran en la tabla 2.6, empleándose líneas de trabajo con menor número de interferencias en el caso del modelo Vista MPX. Se realizaron tres réplicas de cada medida con un tiempo de integración de 10 sg. Para la corrección de interferencias espectrales se han utilizado coeficientes lineales, especialmente en el modelo ICAP 61, al no ser posible el cambio de línea analítica. Con el fin de comprobar la bondad de los resultados se utilizaron patrones certificados de suelos y de elementos metálicos en aguas, siendo la desviación máxima permitida del 15%.

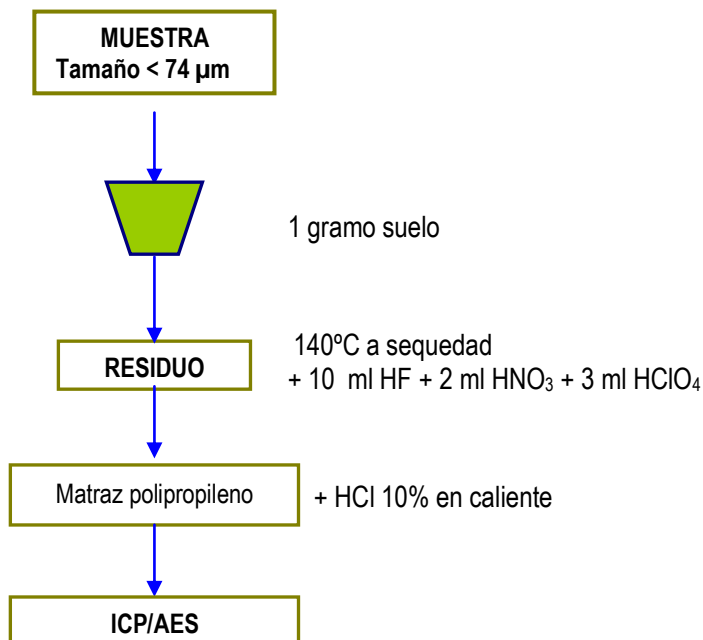
Tabla 2.6. Líneas de trabajo y CMD en muestras sólidas.

ELEMENTO	LONGITUD DE ONDA (nm)	ORDEN ESPECTRAL	CMD (mg/l)
Ag	328.068	2	1
Al	237.324	2	100
As	193.696	2	20 (10)
Ba	493.409	1	1
Be	234.861	2	1
Ca	317.933	2	100
Cd	228.802	3	2
Ce	413.380	1	10 (5)
Co	228.616	2	2
Cr	267.716	2	2
Cu	324.754	2	8
Fe	271.441	1	100
K	766.491	1	100
La	379.478	2	10 (5)
Mg	279.079	2	100
Mn	294.920	1	5
Mo	202.030	3	4 (2)
Na	589.592	1	100
Nb	309.418	2	10
Ni	231.604	2	10
P	214.914	2	100
Pb	220.353	2	10
Sb	217.581	2	10
Sc	361.383	2	1
Ti	336.121	2	100
V	292.402	2	2
W	207.911	2	10
Y	371.080	2	1
Zn	213.856	3	10

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

---

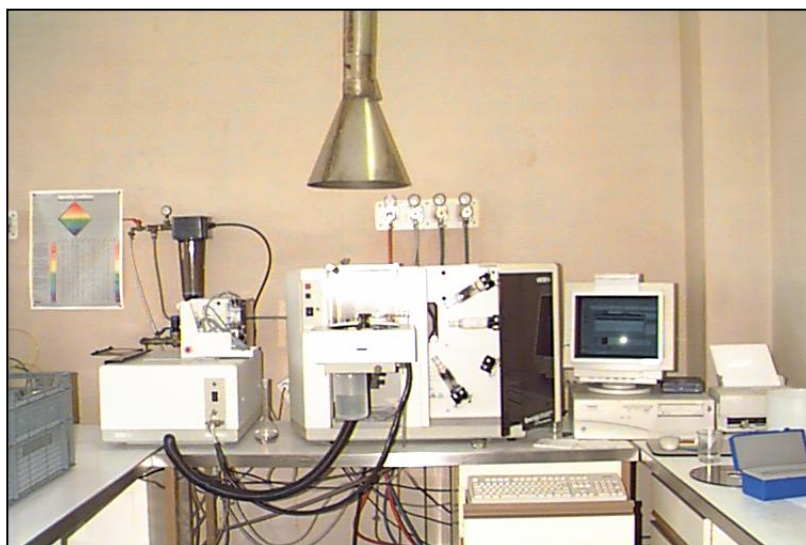
El tratamiento de la muestra se realizó mediante ataque triácido siguiendo el esquema siguiente (Bellido Martín, E., 2004):



Mediante la técnica de *Espectroscopía de Absorción Atómica* se han analizado, principalmente, los contenidos en níquel, hierro y manganeso en suelos obtenidos tras el procedimiento de extracción selectiva utilizado.

Se ha trabajado con dos equipos:

- modelo Philips 9100X, del departamento de Edafología de la Facultad de Farmacia (UCM), para el análisis de contaminación
- modelo SpectrAA-220, del Laboratorio de Aguas del IGME, para la determinación de hierro y manganeso.



Equipo SpectrAA-220

Las características instrumentales y demás análisis realizados mediante esta técnica se explican con más detalle al tratar la metodología analítica en aguas.

### 2.3.1.1.8. Métodos para el estudio de sorción-extracción en suelos

Para el estudio de contaminación por níquel se han llevado a cabo extracciones simples con acetato amónico 1M, utilizando la metodología de adsorción-extracción, que se describe a continuación.

#### 2.3.1.1.8.1. Sorción

Las muestras de suelo (5 g) se introdujeron en tubos de centrifuga y se añadieron 50 ml de solución  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$  a cinco concentraciones diferentes: 1000- 500-250-100-50 mg/l. Tras agitación de las suspensiones durante 2 horas a 500 rpm se deja en reposo 22 horas. Se centrifuga a 3000 rpm durante 10-15 min, se filtra y se mide en el sobrenadante el contenido en Ni por absorción atómica. Por diferencia entre el contenido Ni añadido y contenido Ni medido en solución se obtiene el Ni sorbido por el suelo.

### 2.3.1.1.8.2. Extracción

Para determinar la extracción, sobre el residuo de suelo se añaden 50 ml alcohol 80%, se agita durante 15 minutos a 500 rpm y se centrifuga a 3000 rpm durante 10-15 minutos. Se decanta el alcohol sobrenadante y se deja secar a 25° C. Se trata el suelo con 30 ml de extractante (acetato amónico 1N a pH = 7) agitando y centrifugando durante 3 veces consecutivas. Se recogen los sobrenadantes en matraz y se mide el contenido de Ni en acetato amónico por absorción atómica.

### 2.3.1.2. Análisis físico-químico del agua

#### 2.3.1.2.1. pH y conductividad eléctrica

Se ha determinado la *actividad de los iones hidrógeno* en el agua mediante la técnica electrométrica, utilizando un electrodo patrón de hidrógeno de vidrio y otro de referencia de calomelanos. Entre los bornes de los electrodos sumergidos en la disolución se produce una diferencia de potencial correspondiente logarítmicamente a la concentración de iones hidrógeno presentes en la disolución y se mide con un voltímetro de escala lineal. Para su determinación se ha utilizado un pH-metro Methrom modelo 781 con resolución de 0,01 unidades de pH como mínimo y soluciones reguladoras de pH, a una temperatura lo más próxima a 20°C, dentro de un intervalo de 15-25° C. Se ha seguido el procedimiento interno del Laboratorio de Aguas del IGME, PTE-AG-002, acreditado por la ENAC (nº acred. 62/LE169),

La *conductividad específica* se utiliza para la medida de la concentración de solutos ionizables presentes en la muestra y se define como el producto de la conductancia por la constante de la célula, cuyo valor depende del rango de medida.

La metodología y el procedimiento es el mismo que en el caso de los suelos (véase pto. 2.3.1.1.3).

#### 2.3.1.2.2. Índice de permanganato

El índice de permanganato es una medida convencional de la contaminación de una muestra de agua por materia orgánica y materia inorgánica oxidable (ISO 8467:1993). Se utiliza para evaluar la calidad de aguas potables y aguas naturales, tales como aguas superficiales. Este índice puede usarse en aquellas aguas cuyo contenido en ión cloruro sea inferior a 300 mg/l y se emplea para la determinación del parámetro "Oxidabilidad".



Se han determinado las sustancias oxidables por el permanganato de potasio presentes en el agua, cualquiera que sea su origen (orgánico o mineral), en condiciones normalizadas, expresándose el resultado como concentración másica de oxígeno equivalente a la cantidad de ión permanganato consumida (mg/l de O<sub>2</sub>).

La muestra junto con una cantidad conocida de permanganato (KMnO<sub>4</sub> 0,01N) y de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 1:3(V:V) se calienta durante 10 minutos. Parte del permanganato se reduce por acción de la materia oxidable presente. Mediante la adición de una solución de ácido oxálico (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 0.01N) en exceso y posterior valoración con permanganato se determina el permanganato consumido.

Se ha seguido el procedimiento interno del Laboratorio de Aguas del IGME, PTE-AG-004, procedimiento acreditado por ENAC.

### 2.3.1.2.3. Residuo total a 180°C

Las muestras de agua no son siempre estables y, como consecuencia, el contenido de *sólidos en suspensión* depende del tiempo de almacenamiento, medio de transporte, valor de pH y de otras circunstancias (AENOR, 1997).

Se ha determinado el residuo total a 180°C por gravimetría, definiéndose como residuo total la suma de materiales homogéneos en suspensión y disueltos de una muestra.

Una alícuota de muestra filtrada y bien mezclada se transfiere a una cápsula de evaporación de porcelana, se evapora a sequedad en baño de vapor y posteriormente se seca en estufa a 180° C, durante una hora como mínimo, dejándose enfriar en desecador hasta peso constante. El resultado se expresa como mg de residuo total por litro de agua, con un decimal o cinco cifras significativas como máximo.

Se ha seguido el procedimiento interno del Laboratorio de Aguas del IGME, PTE-AG-005, acreditado por ENAC.

### 2.3.1.2.4. Cianuros

El término cianuro incluye a todos los grupos CN en compuestos de cianuro que se pueden determinar como ion cianuro,  $\text{CN}^-$ , y se clasifican en cianuros simples y complejos. Se ha determinado potenciométricamente el contenido en cianuro en medio alcalino ( $\text{NaOH}$  0,1N) utilizando un electrodo selectivo de cianuro en combinación con un electrodo de referencia de calomelanos conectado a un potenciómetro. El resultado se expresa en mg/l.

El procedimiento interno seguido es el PTE-AG-023 del Laboratorio de Aguas del IGME, Método del electrodo cianuro-selectivo, basado en el Método normalizado para el análisis de aguas potables y residuales, sección 4500- $\text{CN}^-$  F. (Standard Methods, 1989, Ed.17). Este método es aplicable en el rango de concentración de 0,05 a 10 mg de  $\text{CN}^-$ /l.

### 2.3.1.2.5. Sílice

La sílice aparece como óxido en el cuarzo y la arena. En rocas ígneas se combina con metales en forma de silicatos minerales complejos. La degradación de las rocas que contienen sílice explica su presencia en las aguas naturales como partículas en suspensión, en estado coloidal o polimérico, como ácidos silícicos o iones silicato.

El contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) en aguas naturales oscila entre 1 y 30 mg/l, aunque algunas aguas salobres y piélagos pueden alcanzar concentraciones de 100 mg/l e incluso 1000 mg/l.

El método de referencia utilizado es el método automatizado para sílice molibdorreactiva (Método 4.500-Si F. Standard Methods, 17 Ed., 1989) que utiliza un instrumento analítico de flujo continuo (Autoanalizador de flujo continuo Alliance Integral) y cuyo fundamento es la complejación de la sílice en presencia de un molibdato y posterior reducción que da lugar a la formación de azul de molibdeno. La intensidad de color azul es proporcional a la concentración de sílice “molibdato-reactiva”. La interferencia del fosfato es eliminada mediante la adición de ácido oxálico, el cual destruye el complejo molibdofosfórico.

### 2.3.1.2.6. Amonio

El amonio se encuentra en forma natural en las aguas superficiales y residuales, siendo su concentración generalmente baja en aguas subterráneas debido a su adsorción en partículas y arcillas del suelo. Las concentraciones pueden variar desde menos de 10  $\mu\text{g}$  nitrógeno amoniacal/l, en aguas naturales superficiales y profundas, hasta más de 30 mg/l en aguas residuales.

Se ha empleado el método de la sal de fenol (Método 4.500-NH<sub>3</sub> H, Standard Methods, 17 Ed.) mediante autonalizador de flujo continuo. El principio de este método es el siguiente: El fenol alcalino y el hipoclorito reaccionan con el amoníaco para formar azul de indofenol (reacción de Berthelot), el cual es proporcional a la concentración de amoníaco.

Para su medida se ha utilizado el Autoanalizador de flujo continuo Alliance Integral.



Autoanalizador de flujo continuo Alliance Integral

### 2.3.1.2.7. Dureza

La dureza total se define como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio, ambos expresados como carbonato cálcico, en miligramos por litro.

El método de referencia utilizado es el método titulométrico de EDTA (Método 2340C, Standard Methods, 17 Ed), mediante el autoanalizador de flujo continuo Alliance Integral. El método se basa en la adición de EDTA-Mg, el cual transforma el Ca presente en el agua por Mg. El ión magnesio, equivalente al Ca y Mg iniciales, se determina por medida del color púrpura-rojo del complejo formado en presencia del reactivo Calmagita.

### 2.3.1.2.8. Contenido de aniones y cationes

Las técnicas utilizadas para el análisis de aniones y cationes han sido: *Cromatografía Iónica de Alta Resolución (HPIC)*, *Espectrofotometría de Absorción Atómica* (apartado 2.3.1.2..9) y *Espectrofotometría de Emisión Atómica por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-AES)* (apartado 2.3.1.1.7)

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Mediante la cromatografía iónica se han determinado simultáneamente los siguientes aniones:  $F^-$ ,  $BrO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $Br^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $HPO_4^{2-}$  y  $SO_4^{2-}$  y cationes:  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , con contenidos comprendidos en los rangos que se muestran en las tablas 2.7 y 2.8, respectivamente.

Tabla 2.7. Rango de trabajo de aniones analizados (mg/l)

	CI-1	CI-2	CI-3	CI-4	CI-5	CI-6	CI-7	CI-8	CI-9	CI-10	CI-11	CI-12
<b>Fluoruro</b>	50	40	20	10	5	4	2	1	0,5	0,4	0,2	0,1
<b>Bromato</b>	50	40	20	10	5	4	2	1	0,5	0,4	0,2	0,1
<b>Cloruro</b>	50	40	20	10	5	4	2	1	0,5	0,4	0,2	0,1
<b>Nitrito</b>	50	40	20	10	5	4	2	1	0,5	0,4	0,2	0,1
<b>Bromuro</b>	100	80	40	20	10	8	4	2	1	0,5	0,4	0,2
<b>Nitrato</b>	100	80	40	20	10	8	4	2	1	0,5	0,4	0,2
<b>Fosfato</b>	100	80	40	20	10	8	4	2	1	0,5	0,4	0,2
<b>Sulfato</b>	100	80	40	20	10	8	4	2	1	0,5	0,4	0,2

Tabla 2. 8. Rango de trabajo de cationes analizados (mg/l)

	CAT-2	CAT-3	CAT-4	CAT-5	CAT-6	CAT-7	CAT-8	CAT-9	CAT-10	CAT-11
<b>Litio</b>	20	10	5	2,5	2	1	0,5	0,25	0,2	0,1
<b>Sodio</b>	40	20	10	5	4	2	1,0	0,5	0,4	0,2
<b>Amonio</b>	40	20	10	5	4	2	1,0	0,5	0,4	0,2
<b>Potasio</b>	40	20	10	5	4	2	1,0	0,5	0,4	0,2
<b>Magnesio</b>	20	10	5	2,5	2	1	0,5	0,25	0,2	0,1
<b>Calcio</b>	20	10	5	2,5	2	1	0,5	0,25	0,2	0,1

La separación iónica se basa en el proceso de intercambio iónico que sucede entre la fase móvil y los grupos de intercambio unidos a la fase estacionaria. La fase estacionaria consiste en una resina de poliestireno copolimerizada con divinilbenceno y modificada con grupos de intercambio iónico. En el caso de la separación de aniones se trata de grupos de amonio cuaternario, mientras que para la separación de cationes se trata de grupos sulfonato.

Se ha utilizado el cromatógrafo iónico DIONEX- 600 con un sistema de detección de conductividad y sistema de supresión en modo agua externa. La principal función del sistema supresor, como parte de la unidad de detección, es la de reducir químicamente la elevada conductividad de fondo de los electrolitos del eluyente y convertir los iones de la muestra en una forma más conductiva.

Para el análisis de aniones se han usado: una columna analítica AS9-HC en combinación con una pre-columna o columna guarda AG9-HC y como eluyente una solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  9mM a un caudal de 1 ml/min. El volumen de inyección ha sido de 25  $\mu\text{l}$  para el análisis de mayoritarios y 250  $\mu\text{l}$  para el análisis de minoritarios.

Para el análisis de cationes se ha utilizado: una columna analítica CS12A en combinación con una precolumna CG12A, usándose como eluyente una solución de ácido metanosulfónico 20 mN, a un caudal de 1 ml/min. El sistema de detección y volúmenes empleados son los mismos que en aniones.



Cromatógrafo Iónico Dionex-600

Los resultados cuantitativos se obtuvieron mediante la evaluación del área de pico, proporcional a la concentración de analito. La preparación de la muestra se redujo a una simple filtración y en caso necesario a una dilución.

El procedimiento utilizado está basado en el método EPA 300.1 (Hautman & Munch, 1997).

### 2.3.1.2.9. Contenido de elementos

Los contenidos en elementos traza se han determinado mediante *Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-AES)* (apartado 2.3.1.1.7) y *Espectrofotometría de Absorción Atómica*.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

---

Mediante la Espectrofotometría de Absorción Atómica en llama, se analizaron los siguientes metales: Cu, Zn, Fe, Mn, Cd, Cr y Pb, con contenidos comprendidos entre los siguientes rangos (Tabla 2.9.). Para su determinación se siguió el método interno del Laboratorio de Aguas del IGME (PTE-AG-008), acreditado por ENAC.

Tabla 2.9. Rangos de trabajo en llama.

Elemento	Contenido (mg/l)
Cu	0.05-2
Zn	0.05-1
Fe	0.1-1
Mn	0.05-0.5
Cd	0.05-2
Cr	0.1-2.4
Pb	0.1-2.5

Mediante la espectrometría en cámara de grafito se determinaron los metales: As, Cd, Cr, Fe, Mn, Pb y Se, con contenidos comprendidos entre los siguientes rangos (Tabla 2.10). Para su determinación se siguió el procedimiento interno del Laboratorio de Aguas del IGME (PTE-AG-022), acreditado por ENAC.

Tabla 2.10. Rangos de trabajo en cámara de grafito.

Elemento	Contenido (µg/l)
As	5-100
Cd	0.5-55
Cr	2.5-350
Fe	20-360
Mn	10-450
Pb	5-160
Se	5-35



Mediante la espectrofometría de absorción atómica, método del vapor frío, se determinó el contenido en Hg, capaz de reducirse a su estado elemental por la acción de reductores fuertes como el cloruro estannoso en medio ácido. Para su determinación se siguió el procedimiento interno del Laboratorio de Aguas del IGME (PTE-AG-009), acreditado por ENAC.

El equipo utilizado es un espectrofotómetro VARIAN modelo SPECTRAA 220FS con capacidad de corrección de fondo, preferentemente con corrector de Deuterio.

### 2.3.1.2.10. Compuestos orgánicos

La contaminación por compuestos orgánicos volátiles (VOC's) puede deberse a zonas de lixiviación de residuos industriales y domésticos o de desagües ilegales.

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's) suelen ser subproductos del proceso de combustión del petróleo. Son, por lo general, insolubles en agua y muchos poseen carácter altamente carcinógeno en niveles relativamente bajos.

Los pesticidas organoclorados se encuentran, por lo general, en aguas afectadas por evacuaciones agrícolas. Varios de los pesticidas son bioacumulativos y relativamente estables, así como tóxicos y carcinógenos.

En función de los compuestos orgánicos a determinar se han utilizado diferentes técnicas cromatográficas:

Mediante la *Cromatografía de Gases-Captura Electrónica (GC-ECD)* se han determinado los pesticidas, herbicidas y compuestos organohalogenados siguientes: aldrín, dieldrín, heptacloro, heptacloro epóxido A y el heptacloro epóxido B.

La extracción líquido-sólido se realizó empleando cartuchos C-18, concentrando en rotavapor a 1ml. Para su separación y detección se empleó la cromatografía de gases con detector de captura electrónica (GC-ECD), modelo Hewlett Packard 5890 Series II. Para su determinación se ha seguido el método EPA 508.1 (Munch, J. W., 1995).



Cromatógrafo de gases HP 5890 Series.

Mediante la técnica de *Cromatografía de Gases-Masas* se han determinado los siguientes componentes volátiles en agua: bromodiclorometano, bromoformo, cloroformo, dibromoclorometano, tetracloroetano, tricloroetano, benceno y 1,2-dicloroetano.

La extracción de los componentes volátiles se realiza en purga y trampa con el concentrador Tekmar-DOHRMANN<sup>®</sup> 3100 y su separación por cromatografía de gases mediante un cromatógrafo de gases HP6890 GC System acoplado a un detector de masas selectivo HP 5973.

Para su determinación se ha seguido el método EPA 524.2 (Munch, J.W., 1995).



Concentrador Tekmar, HP 6890 GC y HP 5973 MS.

Mediante la *Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC)* se han determinado los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's) en agua potable, por extracción líquido-sólido y HPLC UV-FD. Los PAH's analizados son : benzo(b)fluoranteno, benzo(ghi)perileno, benzo(k)fluoranteno, indeno(1,2,3-cd)pireno y el benzo( $\alpha$ )pireno.



HPLC Agilent 1100 Series

Para la separación y detección de los PAH's se ha empleado la técnica cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) y detectores Ultravioleta y Fluorescencia, modelo Agilent 1100 Series. Se ha seguido el método EPA 550.1 (Hodgeson, J.W., 1990). La extracción de los componentes orgánicos se realizó mediante la técnica de Extracción en Fase Sólida (SPE) empleando cartuchos C-18 y posterior concentración en rotavapor hasta 0.5 ml.



Extracción en fase sólida mediante empleo de cartuchos C-18

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

---

### 2.3.1.2.11. Elementos radioactivos

#### 2.3.1.2.11.1. Tritio

El tritio es un isótopo radiactivo del hidrógeno de número másico 3 ( $H^3$ ), que se desintegra formando helio, con emisión de una partícula beta de energía máxima 18.6 keV y energía media de 5,7 keV. Se origina de forma natural por la interacción de radiaciones cósmicas con la atmósfera y de forma artificial en la fisión del núcleo en explosiones nucleares o industrias nucleares.

Está presente en la naturaleza en forma gaseosa en la atmósfera y en forma líquida en el agua. Las fuentes de tritio en el medio ambiente son: emisión directa por radiación solar, reacciones nucleares en la atmósfera, explosiones termonucleares y usos industriales (centrales nucleares).

Las dos primeras fuentes (tritio cosmogénico) han actuado permanentemente a lo largo del tiempo, produciendo concentraciones entre 2 y 25 unidades de tritio dependiendo de la latitud y la altitud del punto de toma.

Para medir la cantidad de tritio en agua, se realiza una destilación previa a presión atmosférica. Se mezcla una alícuota del destilado con un centelleador líquido, interaccionando las partículas beta emitidas con el centelleador de tal manera que, al volver estas moléculas a su estado fundamental, se produce un destello de luz, el cual un fotomultiplicador transforma en un impulso eléctrico, siendo el número de impulsos en la unidad de tiempo proporcional a la actividad de la muestra.

Normalmente, la concentración de tritio en muestras ambientales es muy baja; por ello, la actividad de tritio se expresa en Unidades de Tritio (UT), donde una UT representa un átomo de Tritio por cada  $10^{18}$  átomos de Hidrógeno o  $1UT = 0,118 \text{ Bq/l}$  de agua, es decir,  $1 \text{ Bq/l}$  equivale a 8,5 UT.



El límite legal es de  $100 \text{ Bq/l} = 850 \text{ UT}$  y la actividad de tritio en las precipitaciones atmosféricas varía de 25 UT en latitudes altas a 4 UT en la zona ecuatorial (Annunziata, 2003).

Se ha utilizado un contador de centelleo líquido, de bajo fondo radiactivo (UNE 73350-3:2003), modelo 1220 QUANTULUS™ de Perkin Elmer.

Contador de centelleo líquido.

## 2.3.1.2.11.2. Actividad alfa y beta total

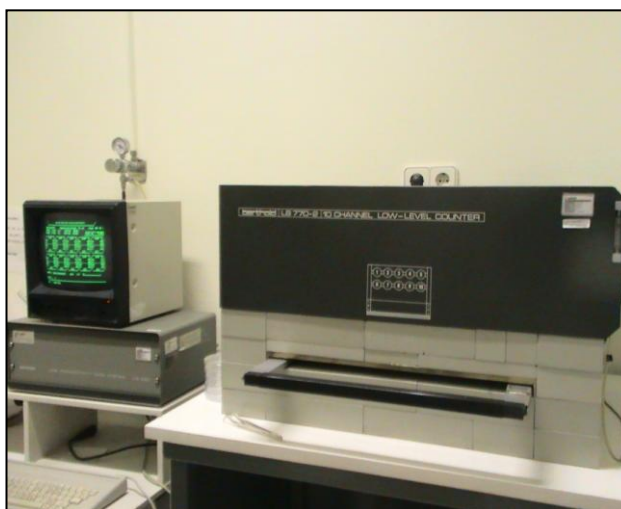
En cuanto a la características radiactivas de las aguas, la concentración de actividad alfa y beta puede ser debida a emisores alfa de origen natural, tales como radionúclidos de las series radiactivas  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , y  $^{40}\text{K}$  o antropogénico procedentes de actividades con radionúclidos, tales como el  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  y  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{129}\text{I}$  - $^{135}\text{I}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{90}\text{Y}$ . De todos ellos, los emisores alfa habitualmente presentes en el agua continental y marina son los isótopos del uranio, así como el  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Po}$  y  $^{210}\text{Pb}$  (WHO, 2004).

Se han determinado el índice de actividad alfa total y beta total, expresado en Bq/l y referidos a  $^{241}\text{Am}$  y  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , respectivamente. Este índice nos va a aportar información del contenido de radionúclidos emisores alfa y beta no volátiles en la muestra y en las condiciones de trabajo establecidas.

El fundamento del método es el siguiente: Las partículas alfa y beta emitidas por las sustancias radiactivas de una muestra de agua interaccionan con el gas PR (argón-metano) excitando sus átomos. Al volver los átomos a su estado fundamental, se produce una cesión de E, que el detector y equipos asociados transforman en impulsos eléctricos. El número de impulsos por unidad de tiempo es proporcional a la cantidad de partículas alfa y beta emitidas por la muestra.

Para su determinación se ha utilizado un contador proporcional de bajo fondo, modelo Berthold LB750L, con detector de flujo gaseoso y equipado con 10 detectores.

Se ha seguido el procedimiento interno del Laboratorio de Aguas del IGME (PTE-AG-006), acreditado por ENAC y basado en las normas UNE- 73311-4:2002 y UNE 73340-2:2003.



Contador proporcional de bajo fondo, Berthold LB750L

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

---

### 2.3.2. Tratamiento estadístico de los datos de análisis

Para el estudio de los distintos parámetros analizados se han utilizado las técnicas de análisis univariante y multivariante, con el fin de resumir la información obtenida y facilitar la labor interpretativa de los datos.

El tratamiento estadístico se aplicó a los resultados obtenidos de los distintos parámetros analizados y se utilizaron los siguientes programas informáticos: SPSS 11.5 y 13.0 para Windows, STATGRAPHICS PLUS 5.0, Excel 2003 y Aquachem 4.0.

#### 2.3.2.2. Análisis univariante

Mediante este análisis se evalúa la tendencia general de los datos estadísticos, permitiendo la caracterización de los mismos. Es útil para la detección y depuración de posibles valores anómalos dentro del colectivo (número de casos).

Entre las medidas de la tendencia central se emplean fundamentalmente dos: la media aritmética ( $\bar{x}$ : resultado de dividir el sumatorio de las magnitudes de los datos por el número total de datos) y la mediana ( $m$ : punto de la distribución bajo el cual queda el 50% de los casos). Se denominan “valores promedios”, expresan el valor alrededor del cual se centran los diferentes datos y se pueden considerar como representativos del total.

Para representar y comparar dos colectivos es necesario una medida de la variabilidad o dispersión, es decir, el grado en que los datos tienden a extenderse alrededor del valor central. Entre estas medidas de dispersión se emplea la desviación típica ( $\sigma$ : desviación promedio de los datos del conjunto con respecto a la media) y la varianza.

Las distribuciones pueden ser simétricas o asimétricas (hacia la derecha o hacia la izquierda), siendo la relación  $m/\bar{x}$  útil para definir la asimetría de la distribución; así como el coeficiente de asimetría, que caracteriza el grado de asimetría de una distribución con respecto a su media.

La asimetría positiva indica una distribución unilateral que se extiende hacia valores más positivos. La asimetría negativa indica una distribución unilateral que se extiende hacia valores más negativos.

Para poder establecer el umbral de aceptación de los valores de un rango se han utilizado los estadísticos percentil 25 ( $p_{25}$ ) y percentil 75 ( $p_{75}$ ).



Con el fin de completar el estudio estadístico univariante se han determinado también el error típico, que es una medida de la cuantía de error en el pronóstico del valor de  $y$  para un valor individual de  $x$ ; y la curtosis, que caracteriza la elevación o el achatamiento relativos de una distribución, comparada con la distribución normal. Una curtosis positiva indica una distribución relativamente elevada, mientras que una curtosis negativa indica una distribución relativamente plana.

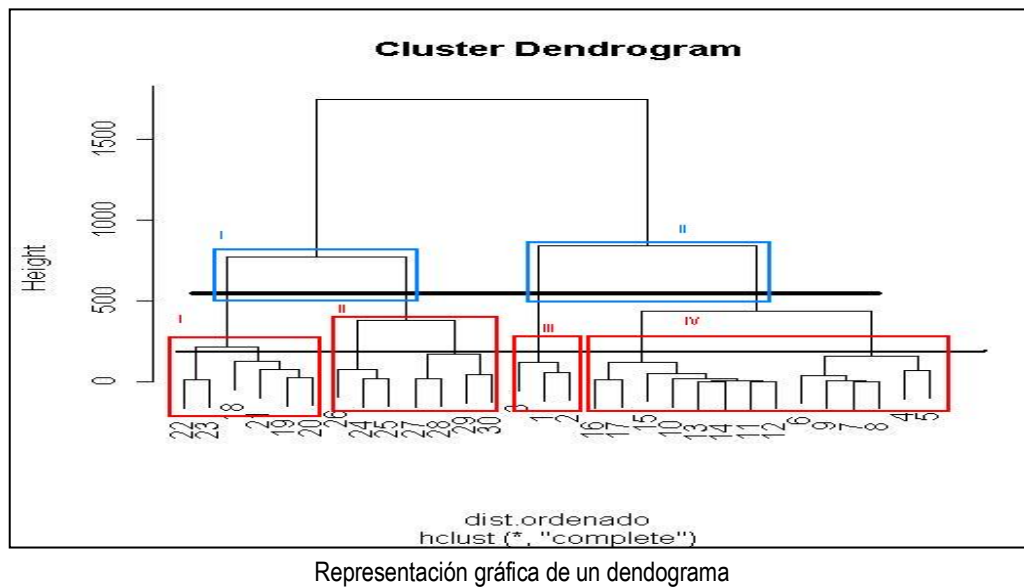
### 2.3.2.3. Análisis multivariable

Además de realizar una primera comprobación entre muestras a través de parámetros individuales, se han considerado simultáneamente todos los parámetros determinados mediante lo que se conoce como métodos multivariantes de análisis. Se consigue así caracterizar el efecto conjunto de las distintas variables y las posibles relaciones entre ellas. Para ello, se ha utilizado el análisis de conglomerados jerárquicos o de cluster (HCA) y el análisis de componentes principales (ACP).

#### 2.3.2.3.1. Análisis de conglomerados jerárquicos (Cluster)

Este análisis tiene como objetivo buscar grupos similares de casos o variables próximos en el espacio. Inicialmente, cada caso o variable forma un cluster individual que posteriormente va conglomerándose con aquellos casos o variables más cercanas. Las distancias entre conglomerados se vuelven a comparar y combinar con los conglomerados más próximos y así sucesivamente hasta que todos los casos o variables queden unidos perteneciendo a un solo conglomerado.

La agrupación de las distintas etapas se muestra sobre un gráfico denominado dendograma, donde el eje vertical explica la similaridad o disimilaridad entre los casos o variables.



### 2.3.2.3.2. Análisis de componentes principales

Este análisis permite, reduciendo la dificultad generada por la gran cantidad de datos que se generan, reconocer las pautas y relaciones entre las distintas variables que se miden para las distintas muestras. Emplea un procedimiento matemático que transforma un número de variables, posiblemente correlacionadas, en un número menor de variables no correlacionadas llamadas componentes principales (PCs), sin pérdida significativa de información. Previamente a la descomposición de la matriz de datos originales, se realiza un autoescalado de datos a varianza unidad, de modo, que todas las variables tengan las mismas influencias sobre el cálculo.

Se emplea generalmente para obtener gráficos representativos de los primeros componentes principales (a menudo los 2 o 3 primeros), con el fin de correlacionar variables, casos o ambos.

**BIBLIOGRAFÍA**

- AENOR, 1997. Calidad del Agua. Determinación del índice de permanganato (ISO 8467:1993). Medio Ambiente- Tomo 1. Recopilación de Normas UNE, pág. 245.
- Annunziata, M.F., Handbook of radioactivity análisis 23. Academia Press. 1998. ISBN 0-12-436603-1.
- Bellido E., 2004. Tesis "Caracterización edafogeoquímica y cálculo de valores de referencia en suelos de la provincia de Salamanca, hoja 503 "Las Veguillas". Ensayo de fitorremediación.
- BOE 163, 9-87 por el que se aprueban los métodos oficiales de análisis físico-químicos para aguas potables de consumo público.
- CSIC, 1990. Mapa de Asociaciones de suelos de la Comunidad de Madrid. Escala 1:200.000. 1ª Edición.
- Drouineau, 1943. Ann Agro 1:16-18.
- EPA-600/4-80-032: Prescribed Procedures for Measurement of Radioactivity in Drinking Water. Method 906.0 "Tritium in drinking water" (1980).
- FAO, 2006. World Reference base for soil resources.
- Gorsuch, T.T. 1959. Radiochemical Investigation on the recovery for analysis of trace elements in organic and biological materials. Analyst. Vol. 84, 135-173.
- Hautman, P. and Munch, J., 1997. Method 300.1 Revision 1.0 Determination of inorganic anions in drinking water by ion chromatography.
- Hodgeson, J.W., 1990. Method 550.1. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water by liquid-solid extraction and HPLC with coupled ultraviolet and fluorescence detection.
- Mehra, O.P., Jackson, M.L., 1960. Clays Clay Miner.
- Munch, J.W. (1995). Method 508.1. Revision 2.0. Determination of chlorinated pesticides, herbicides, and organohalides by liquid-solid extraction and electron capture gas chromatography.
- Munch, J.W. (1995). Method 524.2. Revision 4.1. Measurement of purgeable organic compounds in water by capillary column gas chromatography/mass spectrometry.
- Munsell, 1954. Munsell soil color charts. Munsell color. Company Baltimore U.S.A.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- NEN 5740, Sep. 1991. Investigation strategy for exploratory survey. Netherland Normalisatie-Institut.
- PTE-AG-001 Edición 4. "Procedimiento de determinación de la conductividad eléctrica a 20°C en aguas continentales".
- PTE-AG-002. Edición 5. "Procedimiento de determinación del pH en aguas continentales por potenciometría".
- PTE-AG-004. Edición 3. "Procedimiento de determinación de la oxidabilidad en aguas continentales. Método del permanganato potásico".
- PTE-AG-005. Edición 7. "Procedimiento de determinación de sólidos disueltos a 180°C en aguas continentales por gravimetría".
- PTE-AG-006. Edición 4. "Procedimiento de determinación de la radiactividad alfa y beta total en aguas continentales".
- PTE-AG-008. Edición 7. "Procedimiento de determinación de metales en aguas continentales por espectrofotometría de absorción atómica con llama".
- PTE-AG-009. Edición 7. "Procedimiento de determinación de mercurio en aguas continentales por espectrofotometría de absorción atómica. Método del vapor frío."
- PTE-AG-022. Edición 8. Procedimiento interno: "Procedimiento de determinación de metales en aguas continentales por espectrofotometría de absorción atómica con cámara de grafito".
- PTE-AG-023. Edición 0. Procedimiento interno: "Procedimiento de determinación de cianuros en aguas. Método del electrodo selectivo de iones".
- PTE-MI-003 Edición 0. Procedimiento interno: "Procedimiento técnico de ensayo de análisis granulométrico por sedimentación mediante Sedigraph".
- Standard Methods, 1989. Ed.17. Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Sección 4.500-Si F.
- Standard Methods, 1989. Ed.17. Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Sección 4.500-NH<sub>3</sub> H.
- Standard Methods, 1989. Ed.17. Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Sección 2340C.
- UNE 73311-4:2002: Determinación del índice de actividad beta total en aguas mediante contador proporcional
- UNE 73350-3:2003. Procedimiento para la determinación de la radiactividad ambiental. Equipos de medida. Parte 3: centelleo líquido.

- UNE 73340-2:2003: Procedimiento para la determinación de la radiactividad ambiental. Métodos analíticos.
- Walkley&Black, 1974. A critical examination of rapid method for determining organic carbon in soils. Soil Sci 63, 251-254.
- WHO, 2004. Guidelines for drinking-water quality, 3er edition. Geneve: World Health Organization.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. ESTUDIO DE LOS SUELOS

#### 3.1.1. Parámetros edáficos

Los resultados obtenidos del análisis de parámetros edáficos estudiados se muestran en los anexos I (primer muestreo) y II (segundo muestreo).

##### 3.1.1.1. Textura

Los resultados del *análisis granulométrico* (Figura 3.1) (Anexo I) muestran suelos de granulometría muy similar, lo cual se ve reflejado en los valores medios muy semejantes, tanto en horizontes superficiales como subsuperficiales; con proporciones de arcilla 9,4-9,7%, limo entre 30-33% y arena total 56,9-60,1%; correspondientes, en general, a una clase textural franco-arenosa.



### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

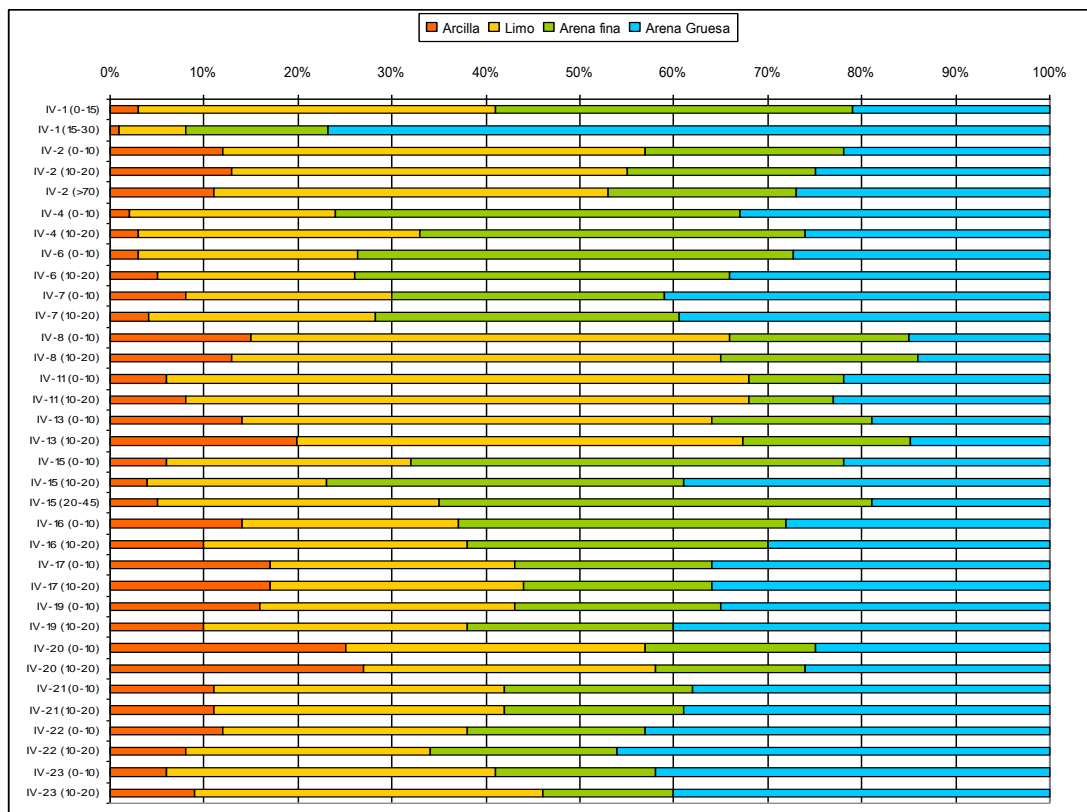


Figura 3.1. Fracciones granulométricas. Primer Muestreo (%)

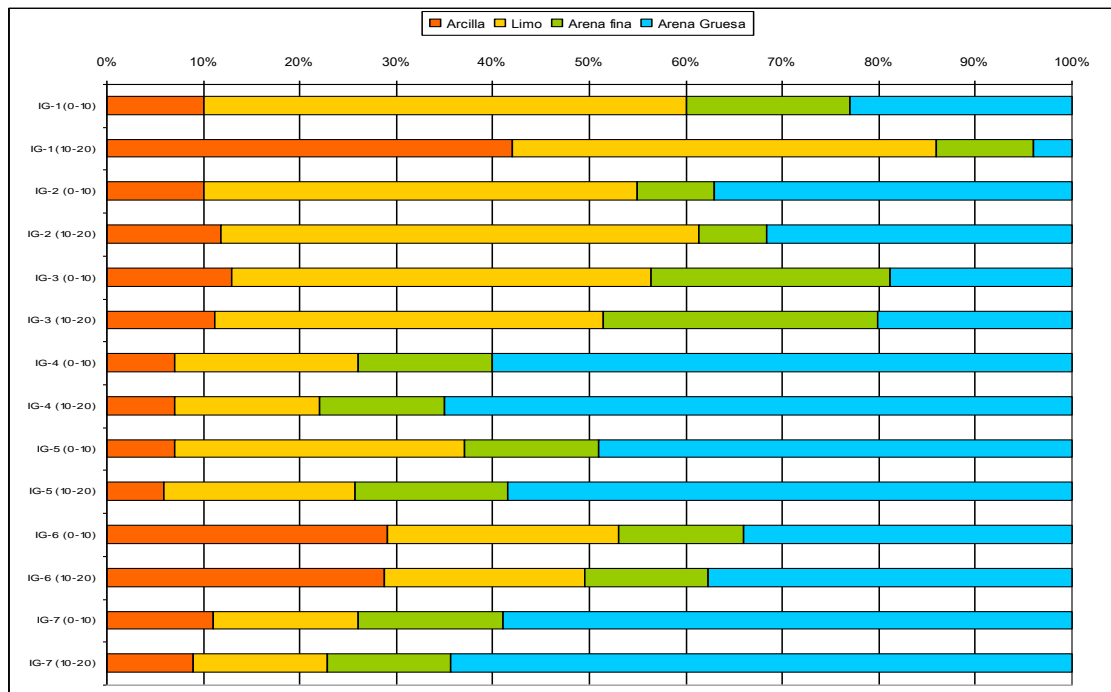


Figura 3.2. Fracciones granulométricas. Segundo Muestreo (%).

Al igual que en el primer muestreo, la granulometría de los suelos del segundo muestreo es muy similar (Figura 3.2) (Anexo II). Los resultados medios en ambos horizontes son semejantes y se encuentran entre 32 y 29% en limo, 12 y 17% en arcilla y 55% en arena, en ambos horizontes, correspondientes a una textura franco-arenosa.

Los principales minerales de las muestras IV-17, IG-3 e IG-6 identificados por difracción de Rayos X (Brindley y Brown, 1980) son (Anexos I y II):

- Muestra IV-17: mica-illita, bitotia, cuarzo, feldespato potásico, feldespato sódico y calcítico, calcita, dolomita.
- Muestra IG-3: mica-illita, cuarzo, feldespato potásico,
- Muestra IG-6: mica-esmectita, sepiolita, cuarzo, feldespato, calcita.

### 3.1.1.2. pH y conductividad

En el primer muestreo, los valores de *pH* en agua en horizontes A varían de 4,97 a 8,04, siendo estos valores algo inferiores en KCl (Figura 3.3) (Anexo I). Los resultados muestran valores de pH medios también muy similares en ambos horizontes (6,5-6,54 en agua y 5,54-5,31 en KCl). El pH en KCl es ligeramente inferior al pH en agua, debido a que se produce un desplazamiento de los iones  $H^+$  y  $Al^{3+}$  de las superficies cargadas del suelo por parte de los iones  $K^+$  de la sal.

Según este parámetro, los suelos se encontrarían clasificados en distintos tipos de suelos (Tabla 3.1), correspondiendo, en general, a suelos con acidez moderada.

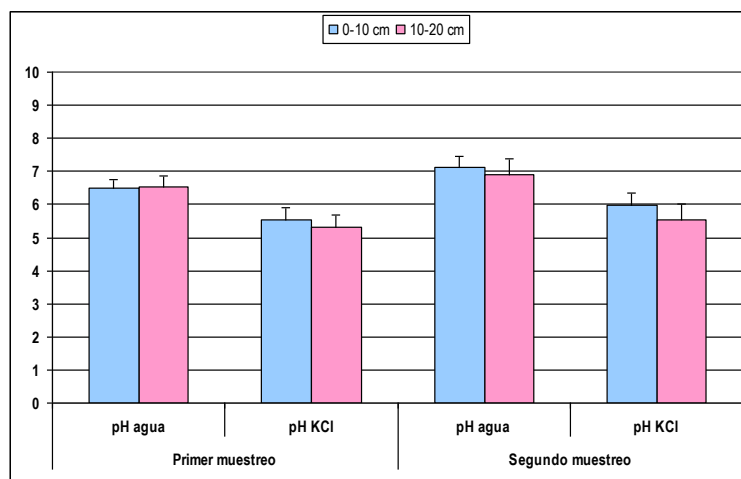


Figura 3.3 Valores promedio de pH en agua y KCl.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el segundo muestreo, los valores de pH en horizontes superficiales varían de 6,00 a 8,22 en agua y de 4,40 a 7,13 en KCl (Figura 3.3) (Anexo II). Los valores medios obtenidos corresponden, según la tabla 3.1, a suelos neutros.

Tabla 3.1. Clasificación de los suelos en función de su acidez (Pérez, G., 2005).

pH	ACIDEZ	CARACTERÍSTICAS
2-4	Suelos con acidez extrema	Oxidación de sulfuros a ácido sulfúrico
4-5.5	Suelos muy ácidos	Aluminio libre
5.5-6.5	Suelos con acidez moderada	Ácidos orgánicos, climas húmedos
6.5-7.5	Suelos neutros	Complejo de cambio casi saturado
7.5-8.5	Suelos carbonatados	Dominio de $\text{Ca}^{2+}$ y $\text{Mg}^{2+}$
8.5-9.5	Suelos sódicos	Dominio de $\text{Na}^+$

El valor medio de *conductividad* en horizontes superficiales es de 83,87  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y de 59,97  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en horizontes subsuperficiales. Si comparamos los resultados obtenidos con los tabulados por la legislación (Tabla 3.2), se obtiene una idea del efecto de la salinidad en el suelo en función del nivel de conductividad. Según este parámetro, las muestras corresponderían a suelos no salinos.

Los valores de conductividad en el horizonte A oscilan entre 63.90 y 142.47  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El valor promedio (97  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de estos perfiles correspondería a un suelo no salino (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Clasificación del tipo de suelo en función del contenido de sales disueltas, expresado como conductividad (Pérez, G., 2005).

dS m <sup>-1</sup> (25°C)	TIPO DE SUELO	EFFECTO
<0.40	No salino	Despreciable, buen crecimiento
0.40-0.80	Ligeramente salino	Buen crecimiento, excepto en caso de sequía prolongada, las sales suben a la superficie dañando a las plantas
0.81-1.20	Moderadamente salino	Sólo crecen las plantas tolerantes a las sales
1.21-1.60	Salino	Muy pocas plantas sobreviven, necesaria la intervención para recuperar la zona.
1.61-3.20	Bastante salino	
>3.20	Muy salino	

## 3.1.1.3. Componentes orgánicos:

Los valores medios de *materia orgánica* y *carbono orgánico*, como cabía esperar, son superiores en horizontes superficiales que en los horizontes subsuperficiales (Anexos I y II).

En el primer muestreo (Figura 3.4), en horizontes A, la proporción materia orgánica varía de 1,70 a 11,24% y la de C orgánico varía de 0,99 a 6,53%.

En el segundo muestreo (Figura 3.4), los porcentajes de materia orgánica y carbono orgánico en el horizonte A varían entre 1,36 y 7,73% y entre 0,79 y 4,50% respectivamente.

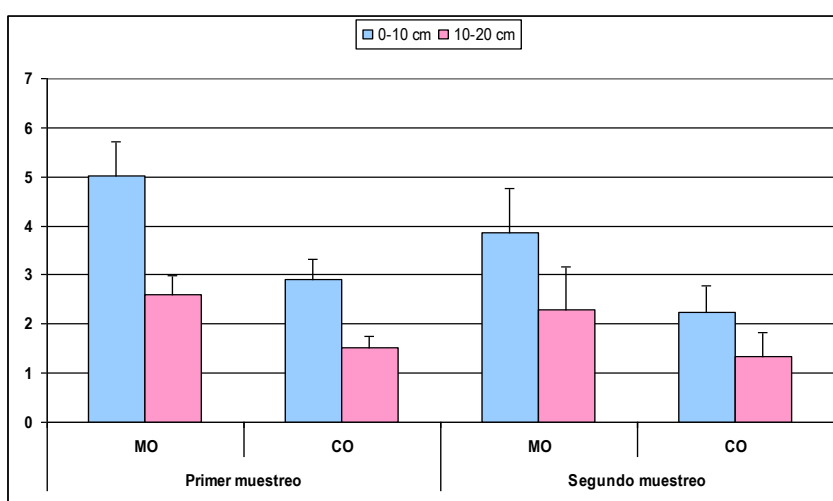


Figura 3.4. Valores promedio de componentes orgánicos (%).

## 3.1.1.4. Carbonatos

Se han determinado los contenidos en carbonatos en los perfiles IV-13, 16, 17 e IG-6 que dan reacción positiva con el HCl. Los valores están comprendidos entre 5-40%, correspondiendo el menor porcentaje al perfil IG-6. Los valores obtenidos de cada perfil son prácticamente iguales en ambos horizontes (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Contenido carbonatos (%).

Perfil	Horizonte (cm)	%Carbonatos
IV-13	0-10	39.86
	10-20	40.17
IV-16	0-10	8.73
	10-20	9.52
IV-17	0-10	13.13
	10-20	15.03
IG-6	0-10	5.85
	10-20	5.47

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

#### 3.1.2. Contenidos de elementos en suelos

Los elementos en roca se encuentran formando parte de los minerales primarios, fundamentalmente silicatos y óxidos, que son poco móviles. Los elementos traza con radio iónico similar al de un elemento principal, siempre que la diferencia no sea superior al 15% (regla de Goldschmidt), pueden sustituirlo isomórficamente y resultar muy difícil su liberación. La sustitución isomórfica se puede llevar a cabo incluso entre elementos de cargas distintas, siempre que el tamaño de su radio no sobrepase el 15% (Krauskopf, 1967).

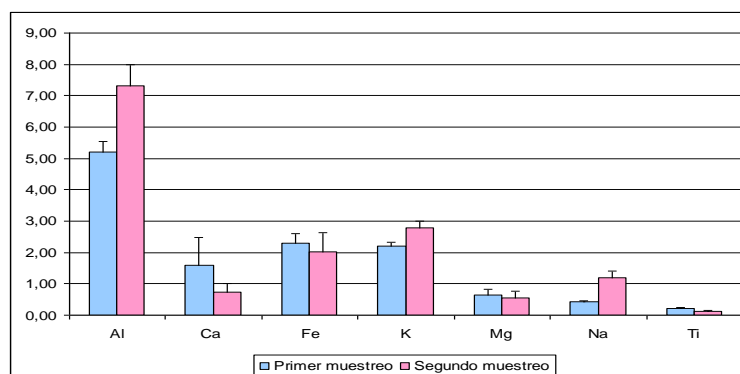
Por desintegración del mineral, estos elementos pueden pasar al suelo en formas disponibles para plantas y también llegar al medio acuoso. Los cationes, una vez liberados, se comportan en el medio según su potencial iónico: los de potencial iónico menor de 3 ( $Z/r < 3$ , donde  $Z$  = carga y  $r$  = radio iónico) pasan a la solución como cationes solubles, los de potencial iónico comprendido entre 3 y 9,5 pueden precipitar como hidróxidos y los de potencial iónico mayor de 9,5 pueden formar complejos aniónicos estables (Loughnan, 1969).

Se ha determinado el contenido total (mg/kg) de los siguientes elementos: Ag, Al(%), As, Ba, Be, Ca(%), Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe(%), K(%), La, Mg(%), Mn, Mo, Na(%), Nb, Ni, P, Pb, Sb, Sc, Ti(%), V, W, Y y Zn, mostrándose los resultados obtenidos correspondientes al horizonte superficial y al horizonte subsuperficial, respectivamente en los anexos III (primer muestreo) y IV (segundo muestreo).

En el primer muestreo, los contenidos en cada elementos tanto en el horizonte superficial como subsuperficial muestran gran similitud en todos los perfiles estudiados. El Ca presenta una mayor variabilidad, con contenidos superiores en los perfiles IV-13, 16 y 17, debido a su naturaleza carbonatada.

En el segundo muestreo, igualmente, se observa gran similitud de contenidos en cada elemento en ambos horizontes de todos los perfiles. La similitud entre contenidos puede indicar que no existe discontinuidad litológica entre los horizontes o que están genéticamente relacionados.

Teniendo en cuenta el contenido total de elementos en suelos se podrían distribuir en 5 grupos según los contenidos medios entre 0,1-7%, 400-600 mg/kg, 20-100 mg/kg, 7-14 mg/kg y 0,007 y 0,015 mg/kg (Figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9, respectivamente).



Figuras 3.5 Contenido medio de elementos entre 0,1-7%

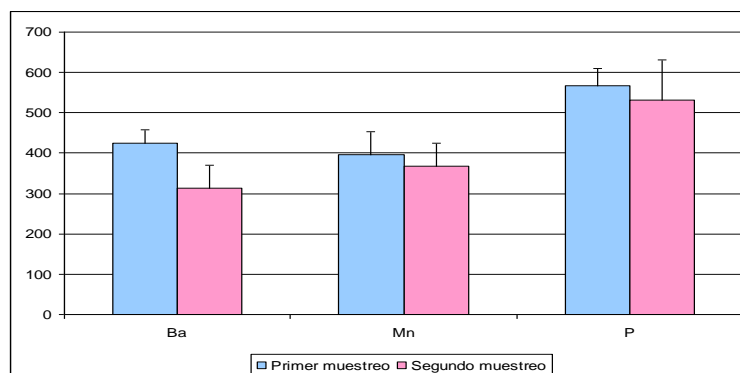


Figura 3.6. Contenido medio de elementos entre 400-600mg/kg

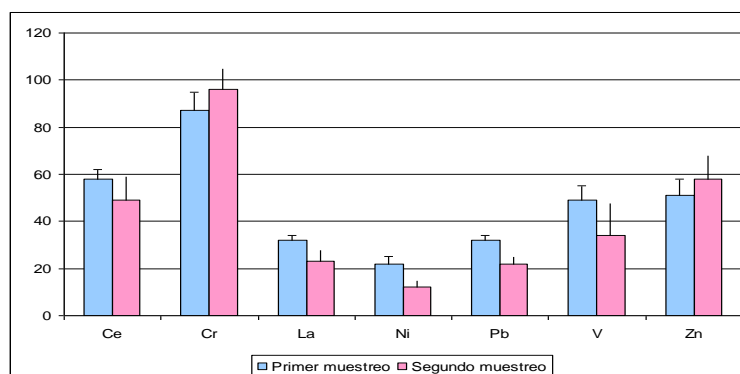


Figura 3.7. Contenido medio de elementos entre 20-100 mg/kg

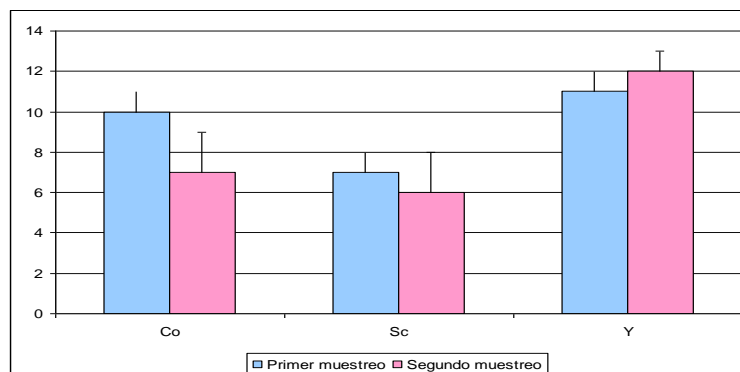


Figura 3.8. Contenido medio de elementos entre 7-14 mg/kg

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

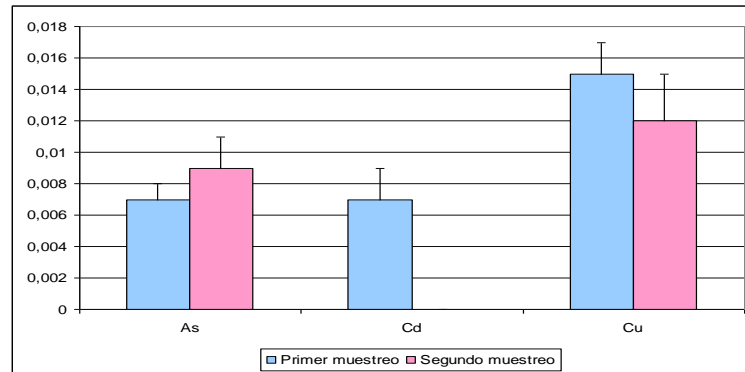


Figura 3.9. Contenido medio de elementos entre 0,007-0,015 mg/kg

Los valores obtenidos coinciden con los elementos mayoritarios y elementos traza de la litosfera (Figura 3.10):

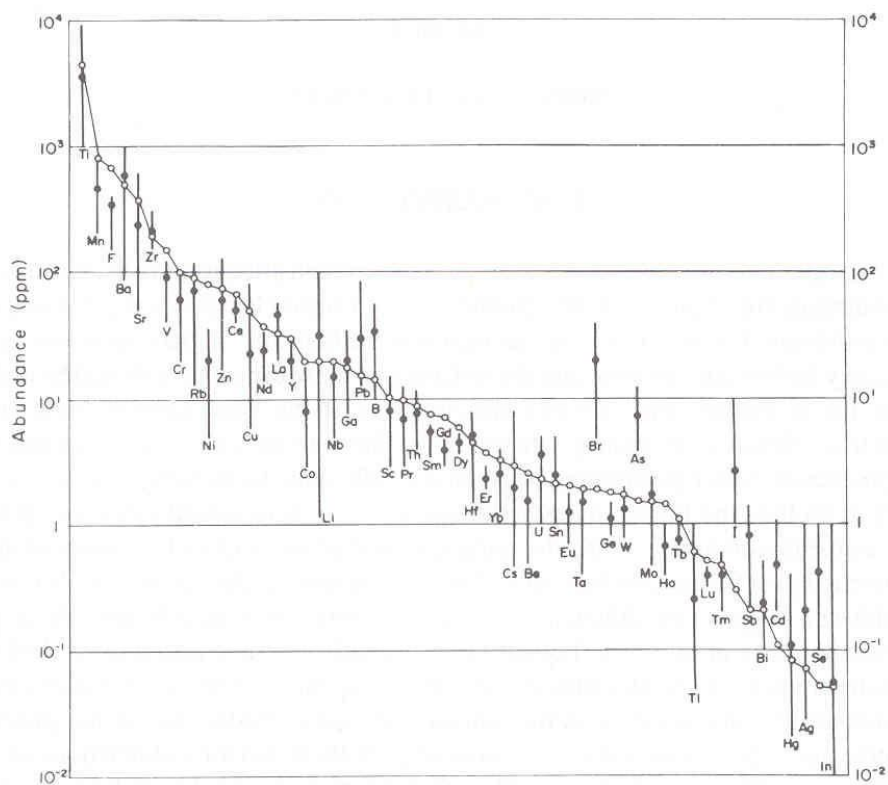


Figura 3.10. Elementos traza en suelos comparados con su abundancia en la litosfera (Kabata Pendias&Pendias, 1992). Círculos abiertos: contenido medio en litosfera, círculo negro: contenido medio en suelo; líneas verticales: valores comúnmente encontrados en suelos.



Se observa una estrecha correlación entre sí de los siguientes elementos: Co-Ni-Fe-Sc-V, los cuales todos ellos se correlacionan, en mayor o menor grado, con el Pb, Zn, Mn, La y Ti. Esta correlación se confirma en el dendograma de variables (Figura 3.12).

### 3.1.3. Índice de alteración Fe libre/ Fe total

La relación Fe libre/Fe total se considera un índice de alteración edáfica, de tal manera que valores próximos a la unidad indican una mayor alteración.

Se han determinado los contenidos en óxidos de hierro y manganeso, cristalinos y amorfos (Tabla 3.4), estableciéndose su relación como índice de alteración.

Los porcentajes de alteración en todas las muestras se encuentran dentro de los rangos correspondientes a suelos de pequeña a mediana evolución (Regosoles, Leptosoles, Cambisoles).

Tabla 3.4. Relación Fe libre/ Fe total. Contenidos en óxidos de Fe y Mn (g/kg) en horizonte superficial.

PERFIL	Fe libre/Fe total	CRISTALINOS		AMORFOS	
		Fe	Mn	Fe	Mn
IV-1	0.1216	3.50	0.019	4.77	0.172
IV-2	0.2399	5.97	0.038	4.74	0.696
IV-4	0.2735	6.51	0.021	3.60	0.342
IV-6	0.3850	13.09	0.025	3.24	0.086
IV-7	0.2874	10.98	0.034	1.76	0.376
IV-8	0.2475	7.03	0.040	2.51	0.498
IV-11	0.2431	9.65	0.031	3.23	0.126
IV-13	0.3364	4.81	0.032	0.54	0.086
IV-15	0.2731	6.80	0.031	2.27	0.118
IV-17	0.1667	2.10	0.040	1.05	0.114
IV-21	0.2309	2.17	0.023	0.61	0.198
IV-22	0.2356	2.05	0.017	0.45	0.068
IV-23	0.1697	7.67	0.036	2.41	0.352
IG-1	0.4157	8.98	0.028	2.25	0.246
IG-2	0.2287	12.37	0.042	5.63	0.350
IG-3	0.2154	4.05	0.025	3.60	0.260
IG-4	0.0636	0.62	0.026	2.91	0.114
IG-5	0.0910	1.07	0.024	3.20	0.218
IG-6	0.0296	0.53	0.028	0.99	0.208
IG-7	0.0621	0.50	0.024	2.01	0.306

Se han determinado los óxidos de Mn debido a que, conjuntamente con los óxidos de Fe, juegan un papel importante en los procesos de sorción.

#### 3.1.4. Índices de acumulación edáfica y factor de enriquecimiento

El *Índice de Acumulación Edáfica (IAE)* es la relación entre el contenido de ese elemento en el suelo y el contenido en el material original.

Un elevado contenido total de elementos en suelos no implica necesariamente la presencia de contaminación antropogénica, ya que los suelos pueden adquirir altas concentraciones en metales por procesos naturales, vía herencia de los materiales originales. Generalmente, en suelos no contaminados el contenido en metales suele ser bajo, sin embargo, rocas máficas y ultramáficas contienen elevadas proporciones de Ni, Co y Cr, que pueden pasar a suelos derivados de ellas (Adriano, 1986; Kabata-Pendias and Pendias, 1992).

Con el fin de determinar la calidad de un suelo o identificar la polución en zonas potencialmente contaminadas se precisa conocer los niveles “background” de metales que corresponden a un suelo específico o tipo de suelo. Estos valores representan la fracción de metal que es heredado del material litológico (contenido geogénico), modificado por los procesos de formación del suelo (contenidos edafogénicos) (ISO, 1996), por lo que es necesario el cálculo del “índice de acumulación” para cada elemento.

En zonas potencialmente contaminadas, el Nivel de Fondo (NF), vendrá dado por el contenido medio de un elemento en suelos con proporciones del mismo inferiores a la media de los suelos de la zona. Se podría considerar como Nivel de Acumulación Ambiental, NAA, el contenido medio de un elemento en suelos con proporciones superiores a la media (Cano, et al., 1997).

En el anexo V se expresan los resultados obtenidos para cada uno de los elementos estudiados. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que, en la mayoría de los perfiles (IV-1, 6, 8, 11, 15 y 17), no existe acumulación de elementos respecto al contenido de la roca original. Los valores indicarían su origen geogénico, más o menos modificado, por los procesos edafogénicos. Esto se corrobora por las correlaciones significativas entre suelo y roca. Existen algunas excepciones puntuales como, en el caso del As y Cu, cuyos contenidos tan bajos pueden ser motivo de error. Los elevados valores que presentan los perfiles IV-7 e IV-13 podrían indicar que el material litogénico analizado no se corresponde con el material genético del suelo.

El *factor de enriquecimiento (FE)* es la concentración relativa de un elemento en un suelo comparado con el de la roca, en relación a un componente o elemento que permanece constante en el proceso de transformación roca-suelo, por lo que se considera de referencia.

Un camino para poder identificar la ausencia de contaminación consiste en asumir que un componente ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o elemento referencia, R (Al), permanece constante en el proceso de transformación roca-suelo y determinar el valor calculado para un metal (VCM) respecto al elemento de referencia, según la ecuación 1.

$$VCM = \frac{M_{\text{horizonteC}} \times R_{\text{horizonteA}}}{R_{\text{horizonteC}}} \quad (1)$$

Cuando la relación entre el valor obtenido del metal (VOM) y el valor calculado del metal (VCM) (ecuación 2) sea próximo a 1 sugiere la ausencia de contaminación exógena (Hoyos y González Parra, 1969; Vázquez et al., 2000).

$$\frac{VOM}{VCM} = \frac{M_{\text{horizonteA}} \times R_{\text{roca}}}{M_{\text{roca}} \times R_{\text{horizonteA}}} \quad (2)$$

Reimann y Caritat (2005) distinguieron entre fuentes naturales y humanas de elementos aplicando el factor de enriquecimiento definido igualmente como:

$$FE = \frac{\frac{El_{\text{suelo}}}{X_{\text{suelo}}}}{\frac{El_{\text{corteza}}}{X_{\text{corteza}}}} = \frac{El_{\text{suelo}} \times X_{\text{corteza}}}{El_{\text{corteza}} \times X_{\text{suelo}}}$$

Donde [El] = concentración de un elemento en mg/kg y [X] = concentración del elemento de referencia (Al, Sc, Zr, Ti).

Se asume que un elemento es de origen geogénico si la relación es próxima a 1, un valor elevado indicaría un origen no específico. Esta predicción, sin embargo, sólo es válida cuando se consideran áreas locales (Reimann and Caritat, 2005).

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se puede usar escandio como elemento de referencia, ya que es, generalmente, considerado de origen litogénico y que llega al suelo por alteración de la roca. El Sc puede sustituir al  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Y^{3+}$  y  $Ti^{3+}$  y se ha usado para calcular el enriquecimiento antropogénico de un metal (Shotyk et. al, 2000).

Hernández et al (2003) determinan dos valores de factor de enriquecimiento (FE) uno, con los contenidos de metales en la corteza ( $FE_1$ ) y otro, con los existentes en el horizonte más profundo del suelo ( $FE_2$ ).

$$FE_1 = \frac{[M / Sc]_{suelo}}{[M / Sc]_{corteza terrestre}}$$

$$FE_2 = \frac{[M / Sc]_{suelo}}{[M / Sc]_{horizonte más profundo}}$$

*M= concentración de metal pesado*

Los valores de  $FE_2$  dentro del rango 0,5-2 se consideran dentro de una variabilidad natural. Mientras que valores superiores a 2 indican enriquecimiento debido a fuentes antropogénicas.

Según la Tabla 3.5, el nivel de contaminación de las muestras se puede clasificar dependiendo del valor del factor de enriquecimiento obtenido (Pérez, G., 2005).

Tabla 3.5. Significado de los factores de enriquecimiento (FE) considerando el Al como elemento de referencia.

CLASE	Factor de enriquecimiento	NIVEL DE CONTAMINACIÓN
I	$X < 2$	Mínimamente favorecido antropogénicamente
II	$2 < X < 5$	Enriquecimiento antropogénico moderado
III	$5 < X < 20$	Aportación antropogénica significativa
IV	$20 < X < 40$	Fuerte aportación antropogénica
V	$40 < X$	Carga antropogénica extrema

Para el cálculo del FE en este trabajo, se ha empleado el aluminio como elemento de referencia. La Figura 3.11 muestra los valores medios obtenidos para los distintos elementos.

Los valores medios obtenidos de los índices de enriquecimiento de elementos de cada uno los suelos (anexo V) correspondería, en general, a un nivel de contaminación mínimo (valores muy próximos a la unidad) (Pérez, G., 2005).

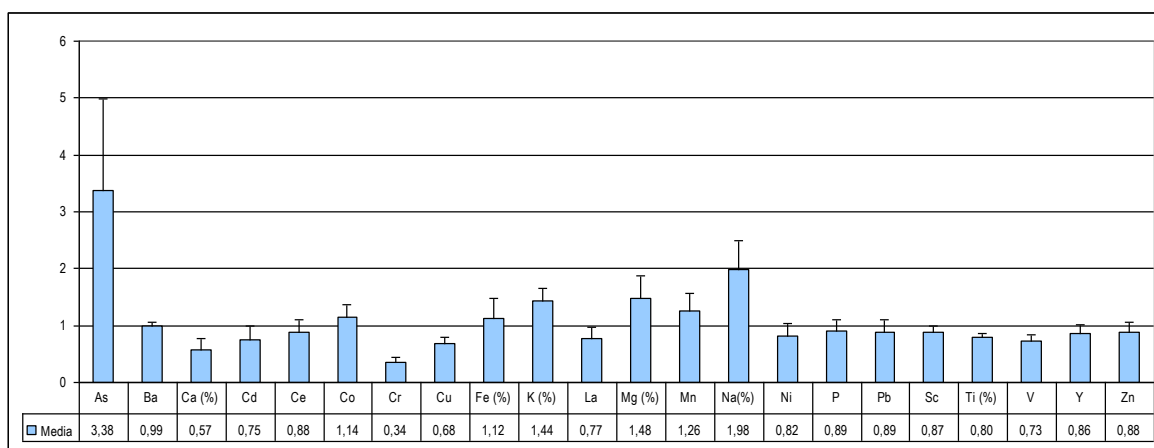


Figura 3.11. Valores promedio de factores de enriquecimiento ( $M_{\text{suelo}}/Al_{\text{roca}}$ ) ( $M_{\text{roca}}/Al_{\text{suelo}}$ ).

La muestra IV-11 presenta niveles de enriquecimiento antropogénico moderado (clase II) para los elementos Cd, Ce, Co, La y Ni y aportación antropogénica significativa para el As. La muestra IV-1 igualmente presenta un nivel de aportación antropogénica significativa para el As (clase III).

### 3.1.5. Estudio estadístico

#### 3.1.5.1. Análisis univariante

Para poder interpretar los datos obtenidos se han de calculado los siguientes descriptivos poblacionales: valor promedio ( $\bar{x}$ ), valor mínimo (mín) y valor máximo (max), tamaño de muestra (N), desviación estándar (S).

Las tablas 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 muestran los estadísticos descriptivos de los principales parámetros edáficos en ambos muestreos. Debe significarse que los valores obtenidos en el segundo muestreo son casi similares a los del primero, lo que confirma que los puntos elegidos representan al conjunto total.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3.6. Estadísticos del análisis granulométrico (%). Primer muestreo.

N = 16	ARCILLA(%)		LIMO (%)		ARENA TOTAL (%)	
Prof. (cm)	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20
Máximo	25	27	62	60	76	91
Mínimo	2	1	22	7	32	32
S	6	7	12	13	14	17
X	11	10	34	32	56	58

Tabla 3.7. Estadísticos del análisis granulométrico (%). Segundo muestreo.

N = 7	ARCILLA(%)		LIMO (%)		ARENA TOTAL (%)	
Prof. (cm)	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20
Máximo	29	42	50	50	74	78
Mínimo	7	6	15	14	40	14
S	8	14	14	15	15	24
X	12	17	32	29	55	55

Tabla 3.8. Estadísticos de conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), pH y componentes orgánicos (%). Primer muestreo.

N = 16	Conductividad		pH en agua		pH en KCl		Materia orgánica		Carbono orgánico	
Prof. (cm)	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20
Máximo	155.20	111.60	8.04	8.12	7.26	7.43	11.24	6.79	6.53	3.95
Mínimo	42.40	18.70	4.97	4.56	3.68	3.20	1.70	0.82	0.99	0.48
S	35.98	29.48	1.04	1.22	1.35	1.48	2.81	1.48	1.63	0.86
X	83.87	59.97	6.55	6.54	5.54	5.31	5.01	2.61	2.91	1.52

Tabla 3.9. Estadísticos de conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), pH y componentes orgánicos (%). Segundo muestreo.

N= 7	Conductividad		pH en agua		pH en KCl		Materia orgánica		Carbono orgánico	
Prof.(cm)	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20
Máximo	142.47	126.33	8.22	8.36	7.13	7.26	7.73	7.12	4.50	4.15
Mínimo	63.90	46.33	6.00	5.50	4.40	3.84	1.36	0.60	0.79	0.35
S	29.61	34.01	0.89	1.22	1.05	1.31	2.35	2.31	1.37	1.35
X	97.39	70.76	7.13	6.91	5.96	5.52	3.87	2.29	2.25	1.33

Los contenidos en arcilla, limo, arena y valores de pH no presentan diferencias significativas entre ambos horizontes.

En los anexos VI y VII se expresan los estadísticos descriptivos de los diferentes elementos analizados, en ambos horizontes y muestreos.

En el primer muestreo, en horizontes superficiales, se observa que la desviación típica es inferior a los valores promedio en todos los elementos a excepción del Ca y el Mg que es superior.

Los valores promedios entran todos en el intervalo de percentiles 25 y 75, a excepción del calcio, debido a que los valores extremos aportan un elevado peso al valor promedio. La relación  $m/x$  muestra una muy buena simetría en la distribución de los datos para casi todos los elementos analizados. Los valores de curtosis caracterizan la elevación o achatamiento relativos de una distribución, comparada con la distribución normal.

Un coeficiente de asimetría positivo con respecto a la media indicaría una distribución unilateral hacia valores positivos, mientras que un coeficiente negativo indicaría una distribución unilateral hacia valores más negativos.

En horizontes subsuperficiales la desviación típica es igualmente inferior a los valores promedio, salvo en el caso del As, Ca, Cd y Mg y, los valores promedio entran en el intervalo de percentiles del 25 y 75% a excepción del Ca, Cd y P. Del mismo modo, los valores de  $m/x$  se aproximan a la unidad.

En el segundo muestreo, en horizontes superficiales, los valores de la desviación típica son generalmente inferiores a los valores promedio, encontrándose en su mayoría estos valores promedio entre los percentiles del 25 y 75%. En horizontes subsuperficiales, valores de la desviación típica del Ca, Mg, Sb y V superan los valores promedio, entrando, estos últimos, todos entre los percentiles del 25 y 75%. El grado de simetría ( $m/x$ ) es muy similar en ambos horizontes.

El anexo VIII contiene los estadísticos descriptivos de los índices de acumulación edáfica y factores de enriquecimiento obtenidos. Los valores de la desviación típica son superiores al valor promedio en los siguientes elementos: As, Cd y Fe, de los cuales los valores promedio del As y Fe no entran dentro de los percentiles 25 y 75. La distribución de los datos es, en general, simétrica salvo para el caso del As con un valor de  $m/x = 0,42$  y el cadmio con un valor de 0,59.

Los niveles de confianza para la media nos indican el elevado margen de incertidumbre que pueden tener los datos obtenidos para cada uno de los elementos.



### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1.5.2. Análisis multivariante

Para poder detectar la estructura de los datos y relaciones entre los elementos, se ha utilizado la técnica multivariante de Conglomerados jerárquicos (Cluster) y la de Componentes Principales (PC's).

Este análisis se ha realizado con los datos obtenidos en el horizonte superficial de ambos muestreos en conjunto (IV+IG).

##### 3.1.5.2.1. Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados (cluster) busca agrupar elementos (o variables), tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos ([www.uoc.edu](http://www.uoc.edu)). Nos hemos basado en algoritmos jerárquicos acumulativos formando grupos al ir haciendo conglomerados cada vez más grandes. El dendograma, representación gráfica, ayuda a interpretar el resultado del análisis de cluster.

##### 3.1.5.2.1.1. Cluster de variables

En la figura 3.12 se muestra el dendograma obtenido para el cluster jerárquico de variables.

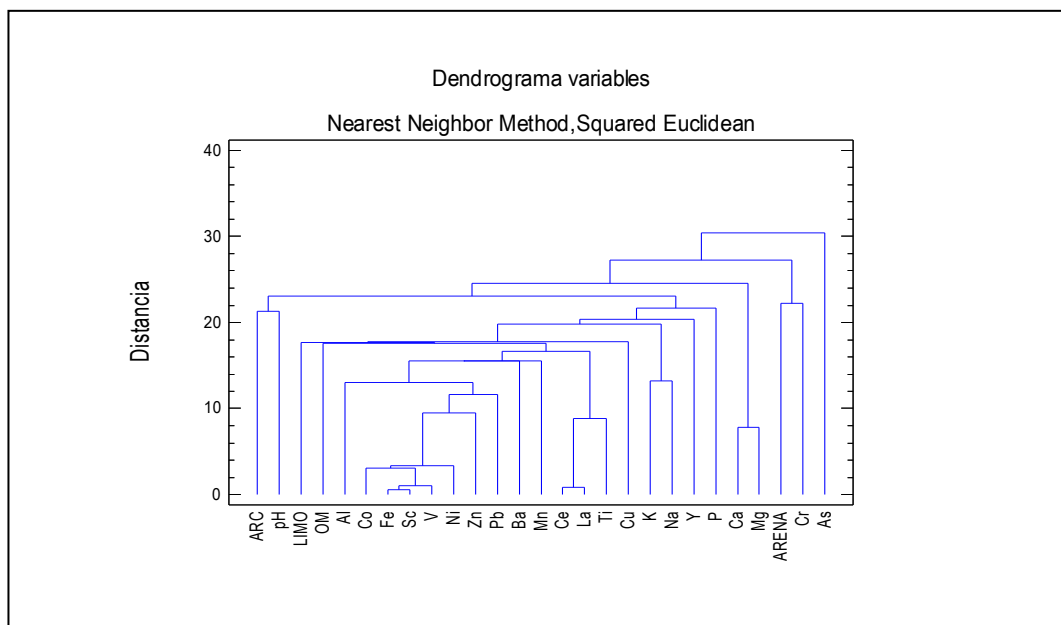


Figura 3.12. Cluster de variables (n= 27) del horizonte superficial del primer y segundo muestreo.

En el dendrograma queda reflejada la formación de los conglomerados, así como las diferencias entre ellos. Se puede observar, por ejemplo, que el arsénico es el elemento más distante del resto, ya que es el último en incorporarse al cluster final, seguido por arena y cromo; calcio y magnesio. Por el contrario, las observaciones más cercanas entre sí son el hierro y el escandio (distancia más próxima a cero) y el cerio y el lantano.

De este dendrograma, se puede afirmar que los datos obtenidos son, en general, bastante homogéneos, ya que la mayoría de las observaciones quedan a una distancia inferior a 20 del resto. Sin embargo, existen algunas que se alejan de las demás, como es el caso del As (distancia >30), cromo, fracción arena, calcio y magnesio.

Al igual que en el estudio de correlaciones, existe una estrecha relación entre los elementos Co-Fe-Sc-V, los cuales se correlacionan a su vez con el Ni, Zn y Pb.

#### 3.1.5.2.1.2. Cluster de casos

Se realizó el análisis de cluster de casos del horizonte superficial de las dos fases de muestreo, usando como matriz de entrada el cuadrado de la distancia euclidiana, obteniéndose un grupo principal (Figura 3.13) y el más amplio que abarca prácticamente la mayoría de las muestras.

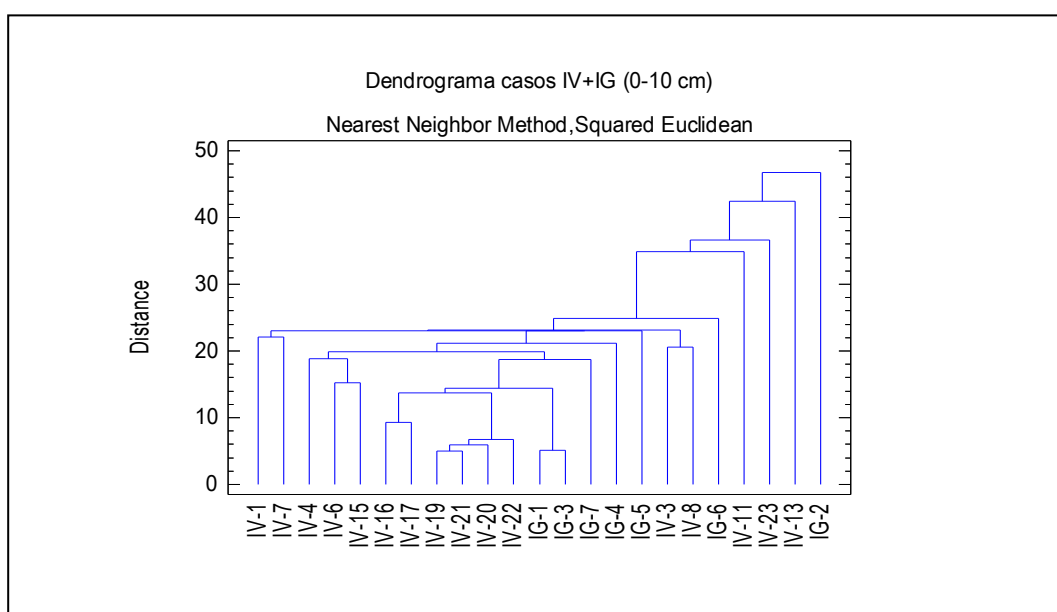


Figura 3.13. Cluster de casos (n=23) del primer y segundo muestreo.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

En este dendograma, la observación más distante corresponde a la muestra IG-2, seguida de las muestras IV-13, IV-23, e IV-11. Estas muestras presentan, respecto al resto, contenidos más elevados en elementos como Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cu, Fe, La, Mg, Mn, Ni, P, Sc, V y Zn. Por el contrario, las observaciones más cercanas corresponden a las muestras IV-19 e IV-21, seguidas de las muestras IG-1 e IG-3.

Del mismo modo que en el dendograma de variables, se observa la homogeneidad de las muestras, ya que casi un 80% de las mismas se encuentran a una distancia inferior a 20 del resto.

#### 3.1.5.2.2. Análisis de componentes principales (PC's)

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables) ([www.uoc.edu](http://www.uoc.edu)). Los nuevos componentes principales o factores serán una combinación lineal de las variables originales y, además, independientes entre sí. Un aspecto clave es la interpretación de los factores, que será deducida tras observar la relación de estos con las variables iniciales (signo y magnitud de las correlaciones).

Mediante esta técnica se han obtenido, de las 28 variables iniciales, 7 componentes o factores principales, que juntos, suponen el 87,10% de la variabilidad de los datos originales (I: 37,49%, II: 15.13%, III: 12.56%, IV: 8.26%, V: 5.49%, VI: 4.66% y VII: 3.67%) (Tabla 3.10).

Tabla 3.10. Tabla de componentes principales.

Componente	Valor propio	Varianza (%)	Porcentaje acumulado
1	10.4973	37.490	37.490
2	4.23548	15.127	52.617
3	3.51688	12.560	65.177
4	2.31145	8.255	73.432
5	1.53684	5.489	78.921
6	1.30351	4.655	83.576
7	1.02797	3.671	87.248

Una vez seleccionados los componentes principales, se representan en forma de matriz (correlaciones entre variables y componentes principales) (Tabla 3.11). En este caso observamos correlaciones bajas en la componente 1, la cual se correlaciona negativamente con la mayoría de variables y lo hace positivamente con el pH (0.24), K (0.15), arcilla, arena, sodio y calcio. La segunda componente se correlaciona positivamente con el Mg (0.40), Ca (0.39), P (0.34), materia orgánica (0.26) y limo (0.20). Por último, la PC3 tiene una correlación positiva con la arcilla (0.26), Ce (0.22), La y Ca entre otros.

Tabla 3.11. Tabla de pesos de las componentes.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Arc	<b>0.1196</b>	0.0793	<b>0.2578</b>	-0.3797	0.2075	0.1995	0.0784
Limo	-0.1926	<b>0.2047</b>	<b>0.1716</b>	-0.0480	-0.0999	0.4312	0.0359
Arena	<b>0.1174</b>	-0.2209	-0.2753	0.2210	-0.0072	-0.4750	-0.0666
pH	<b>0.2436</b>	<b>0.1141</b>	0.0074	-0.1982	0.2287	-0.1741	-0.1198
MO	-0.1464	<b>0.2569</b>	-0.1786	0.2689	-0.1562	0.2797	-0.0293
Al	-0.1364	0.0681	-0.3145	-0.4363	-0.0345	-0.0435	0.0282
As	-0.0503	<b>0.1452</b>	<b>0.1750</b>	-0.2289	-0.2904	-0.3797	-0.2871
Ba	-0.2037	-0.2278	0.06216	0.02426	0.4259	0.0003	0.0039
Ca	0.0870	<b>0.3889</b>	<b>0.2065</b>	0.1078	0.0633	-0.2532	0.2100
Ce	-0.2172	-0.2048	<b>0.2218</b>	-0.1356	-0.1109	-0.0010	-0.1348
Co	-0.2902	0.06817	-0.0746	-0.0212	0.1242	-0.0052	-0.0209
Cr	-0.0210	-0.3145	-0.2476	0.1808	-0.1956	0.0287	0.3086
Cu	-0.1675	<b>0.1453</b>	-0.0539	0.07336	-0.3955	0.0797	-0.1533
Fe	-0.2890	0.0290	-0.1214	-0.1006	0.0561	-0.1989	0.0174
K	<b>0.1460</b>	-0.1178	-0.3053	-0.3263	0.1319	0.2016	-0.1891
La	-0.2388	-0.1683	<b>0.2194</b>	-0.0544	-0.0697	-0.0339	-0.1477
Mg	-0.0067	<b>0.4031</b>	<b>0.1178</b>	-0.0141	0.1126	-0.2218	0.3607
Mn	-0.1975	-0.1066	-0.065	-0.0831	0.1232	0.02323	0.5640
Na	<b>0.1154</b>	0.0521	-0.3555	-0.3280	-0.2218	0.01400	0.1747
Ni	-0.2754	0.1049	-0.0638	0.1242	0.0413	0.02178	-0.0535
P	-0.0065	<b>0.3411</b>	-0.2391	0.1285	-0.0294	-0.0537	-0.1534
Pb	-0.2236	0.0157	-0.0630	0.1044	0.3727	0.0264	-0.3379
Sc	-0.2899	0.0427	-0.0943	-0.1185	0.0523	-0.1879	0.0402
Ti	-0.2338	-0.1679	<b>0.1660</b>	0.0471	-0.1441	-0.0716	0.1663
V	-0.2942	0.0490	-0.0735	-0.0242	0.1322	-0.1685	0.0005
Y	-0.1026	-0.1450	<b>0.2111</b>	-0.2587	-0.3030	-0.1280	0.0408
Zn	-0.2192	<b>0.1672</b>	-0.2218	-0.14277	0.0155	0.0464	-0.0098

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de estandarizar los datos, con el fin de poner a la misma escala todos los factores, observamos que casi un 40% (eje 1) (Figura 3.14) está explicado por la relación negativa que existe entre el pH y la mayoría de los elementos, lo cual se corrobora posteriormente en el análisis de correlación. El segundo eje explica un 15% de la varianza y estaría definido por la materia orgánica y limo, calcio y magnesio. Por último, el tercer eje (13%) estaría definido por la arcilla.

Materia orgánica y pH se localizan en lados opuestos del eje, lo que significa que cuando uno crece el otro decrece y viceversa, lo cual está de acuerdo con los procesos edafológicos.

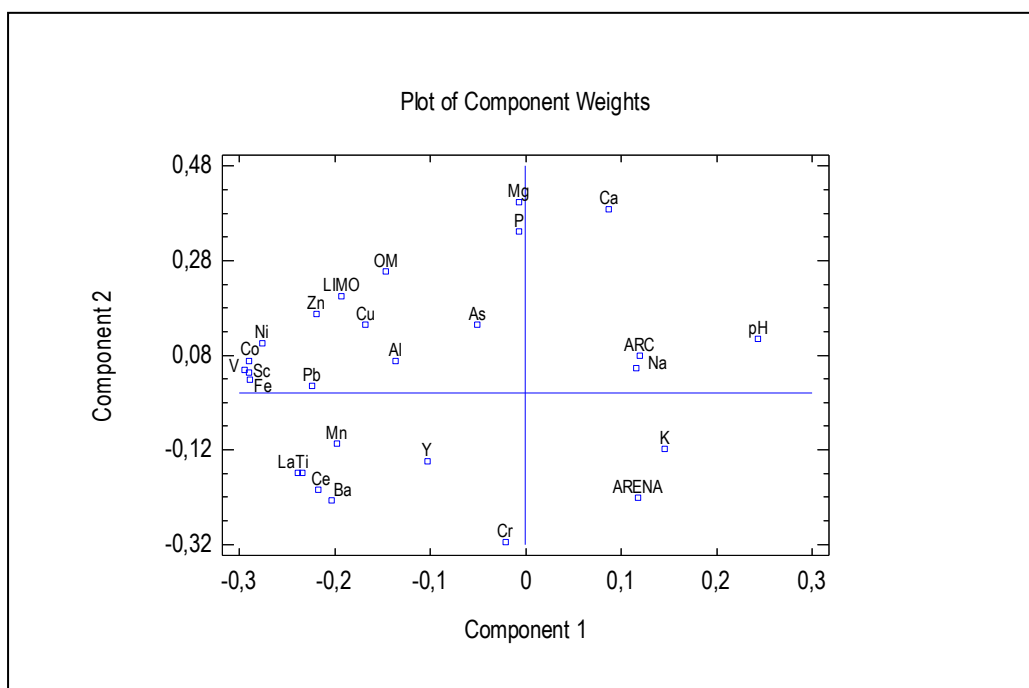


Figura 3.14. Diagrama de los pesos de la componente 1 y 2.

#### 3.1.5.3. Análisis de coeficientes de correlación

A partir de la estadística expuesta, se han establecido las diferentes relaciones de los elementos y los parámetros edáficos. Se han analizado conjuntamente los coeficientes de correlación de horizontes superficiales y subsuperficiales (anexo IX) de ambos muestreos.

Los valores en negrita son significativamente diferentes a 0 con un nivel de significación alfa = 0,05. Las correlaciones observadas en ambos horizontes son similares y pueden resumirse en los siguientes puntos:

- En estos suelos la materia orgánica se correlaciona negativamente con la arcilla ( $r = -0.423$ ) y positivamente con la fracción limo ( $r = 0.511$ ).
- Las fracciones limo y arcilla presentan correlación negativa con la arena ( $r = -0.884$  y  $r = -0.449$ , respectivamente).
- El pH se correlaciona positivamente con la arcilla ( $r = 0.516$ ) y negativamente con la materia orgánica ( $r = -0.489$ ).
- Los elementos que presentan correlación significativa y negativa con la arcilla son el cromo ( $r = -0.423$ ) y níquel ( $r = -0.427$ ).
- El cromo es el único elemento que se asocia con la arena ( $r = 0,495$ ).
- Todos los elementos se correlacionan negativamente con el pH, a excepción del K.
- Con la materia orgánica se asocian positivamente y significativamente Co, Cu, Ni, P, V y Zn, que estarían constituyendo complejos organometálicos. Con el limo se asocian positiva y significativamente el Ce, Co, Fe, La, Ni, Sc, V y Zn, que estarían formando parte de estructuras minerales. Los elementos que presentan correlaciones a un máximo nivel de significación con las distintas fracciones y parámetros edáficos son Pb con limo y materia orgánica, y Ni con limo (Cala et al., 1985).
- Según los coeficientes de correlación entre elementos se puede observar la existencia de algunas asociaciones preferenciales ( $0.8 < r < 1$ ) como: Ca-Mg, La-Ce, Co-Ni-Fe-Sc-V, asociándose cada uno de ellos, en mayor o menor grado, con Pb-Zn y con Mn-La-Ti.
- Los óxidos de Fe amorfos están correlacionados negativa y significativamente con la arcilla ( $r = -0.573$ ) y con el pH ( $r = -0.747$ ), lo que indica que los óxidos de Fe no estarían recubriendo a la fracción arcilla. Se asocian positivamente a la materia orgánica ( $r = 0,547$ ) con Al, Co, Cr, Mn, Sc, V y Zn.

Establecidos los coeficientes de correlación entre elementos (anexo IX), se puede observar la existencia de algunas asociaciones preferenciales con correlación positiva y muy significativa ( $0,8 < r < 1$ ) y significativa ( $0,6 < r < 0,8$ ) (Tabla 3.12), que quedan posteriormente confirmadas en el estudio estadístico.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3.12. Correlación entre elementos.

Elemento	Coeficiente de correlación	
	0,8<r<1	0,6 < r < 0,8
Al		Fe, Sc, Zn
Ba		La, Pb, V
Ca	Mg	
Ce	La, Ti	
Co	Fe, Ni, Pb, Sc, V, Zn	
Fe	Co, Ni, Sc, V, Zn	Al, Mn, Pb
K		Na
La	Ce, Ti	Ba, Fe, Sc, V
Mg	Ca	
Mn		Fe, Sc, V
Na		K
Ni	Co, Fe, Sc, V	Pb, La, Zn
Pb		Ba, Co, Fe, Ni, Sc, V
Sc	Co, Fe, Ni, V	Al, La, Mn, Pb, Sc, Ti, Zn
Ti	La,	Ce, Sc, V
V	Co, Fe, Ni, Sc	Ba, La, Mn, Pb, Ti, Zn
Y		Zn
Zn		Al, Co, Fe, Ni, Sc, V, Y

#### 3.1.6. Valores de referencia

##### 3.1.6.1. Consideración preliminar

Para poder llevar a cabo la determinación del nivel de referencia de la zona muestreada se ha partido de la composición química de los diferentes suelos desarrollados en el mismo, con objeto de establecer cuál es el contenido de una serie de elementos y compuestos inorgánicos de los suelos que no están afectados por la actividad humana o, que la influencia de dicha actividad es mínima.

Para ello, se procedió a la caracterización química de las muestras sólidas del primer y segundo muestreo, por separado, y al posterior tratamiento estadístico de los resultados obtenidos conjuntamente.



Los elementos traza del suelo son de origen natural, consecuencia de la alteración del material original y su distribución en el suelo está influida por procesos edafogenéticos (Davies, 1980). Sin embargo, estos elementos pueden llegar al suelo también como consecuencia de la actividad humana. De ahí que las concentraciones “background” o contenidos geogénicos de un elemento modificados por los procesos de formación del suelo (contenidos edafogénicos), se puedan utilizar para estimar su grado de contaminación.

La determinación de valores “background” no supone sólo un problema científico, conlleva importantes implicaciones económicas (Salminen and Gregorauskiene, 2000).

Matschullat et al. (2000) usaron varios métodos estadísticos, como considerar el valor medio de un elemento en el horizonte C más dos veces la desviación estándar ( $X+2S$ ), para determinar el nivel “background” o geoquímico. Reiman et al (2005) modificaron esta fórmula sustituyéndola por la mediana  $\pm 2$  desviación absoluta de la mediana. Salminen and Tarvainen (1997) consideraron la importancia de tener en cuenta estas bases geoquímicas a la hora de establecer la polución del suelo, con el fin de establecer la legislación medioambiental y tomar decisiones políticas.

Sin embargo, es muy importante reconocer que el nivel “background” depende de la localización y escala que se considere y que cambia de un área a otro área, así como de la escala del área investigada (Reinmann and Garrent, 2005), dependiendo de la composición mineralógica del material original, es decir, es fundamental la influencia del sustrato geológico (Horckmans et. al, 2005), y del proceso de alteración que haya tenido lugar en la formación del suelo, pero también de la granulometría, el contenido en arcilla y en materia orgánica (Salminen and Tarvainen, 1997). Por tanto, para la evaluación de suelos contaminados, es importante utilizar niveles “background” apropiados referentes a un área concreta.

Los “Valores de Referencia” (IHOBE, 1993) para metales, a nivel local o regional, se calculan usualmente a partir de los niveles “background” en suelos con similares características y desarrollados a partir del mismo material original ( $VR = NB + 2s$ ), siendo VR el valor de referencia, NB, el nivel “background” y s la desviación estándar.

En Holanda, los valores de referencia para metales pesados, propuestos como protección del suelo, vienen dados en función del contenido en arcilla y/o del contenido en materia orgánica de un suelo considerado como estándar. Así, se dan los siguientes valores guía para algunos elementos:  $10+L$  para Ni y  $50+2L$  para Cr (Tabla 3.14), siendo L el porcentaje de arcilla en el suelo (Förstner, 1995; Vegter, 1995).

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Otro criterio sería analizar la dependencia observada en la correlación y la regresión de los elementos con los parámetros edáficos de arcilla y/o materia orgánica, junto con el contenido total en Fe. Según este criterio, que es el utilizado en este trabajo, el valor de referencia se ha calculado siguiendo la fórmula siguiente:

$$VR = VF + a \text{ Arcilla} + b \text{ Materia orgánica} + c \text{ Fe total}$$

Donde VR = valor de referencia, VF = valor de fondo o geogénico, a, b y c son los coeficientes de dependencia derivadas de las pendientes de las rectas de regresión entre cada elemento y el parámetro edáfico, dividiéndose por su factor de contribución, según el número de variables consideradas (Vázquez, I., 1999). El valor de fondo corresponde a la media aritmética o geométrica, según el tipo de distribución sea normal o logarítmica.

Estos valores sirven para comprobar la existencia de concentraciones anormales de elementos en suelos, a partir de los cuales se puede considerar que existe contaminación.

La determinación de los valores de referencia es crucial para abordar la legislación medioambiental española (BOE; 18/01/2005).

#### 3.1.6.2. Valores de referencia propuestos:

De entre los 22 elementos examinados, dependen exclusivamente de la arcilla 2 elementos, el cromo y el níquel; de la materia orgánica dependen seis elementos: cobalto, cobre, níquel, fósforo, vanadio y zinc; y finalmente del contenido en hierro dependen 8 elementos: lantano, manganeso, níquel, plomo, escandio, titanio, vanadio y zinc.

La tabla 3.13 muestra las ecuaciones de regresión múltiples obtenidas de aquellos elementos que han dado significación positiva entre las variables consideradas, los valores de significación (p-value) para cada variable, valor  $R^2$ , nivel de confianza y la variable a eliminar del modelo.

En el análisis de regresión múltiple se ha aplicado la transformación Box-Cox, con el fin de estabilizar la varianza de las series y ajustarlos a una distribución normal.

Se observa, en casi un 80% de los casos, que es la variable arcilla la que menos se ajusta a este modelo de regresión múltiple (ver Tabla 3.13).

Tabla 3.13. Rectas de regresión, p-values  $R^2$ , nivel de confianza, variable a eliminar.

	RECTA DE REGRESIÓN	p-value			$R^2$	NIVEL CONFIANZA (%)	VARIABLE A ELIMINAR
		Arc	MO	Fe			
<b>Al</b>	$3.26+0.04ARC-0.006MO+0.97Fe$	0.4461	0.9642	0.0015	44.5967	99	Materia orgánica
<b>Ba</b>	$324.42-1.51ARC-18.49MO+76.52Fe$	0.7299	0.0969	0.0022	43.1147	95	Arcilla
<b>Ce</b>	$41.65+0.17ARC-2.59MO+10.71Fe$	0.7874	0.1017	0.0025	40.4226	95	Arcilla
<b>Co</b>	$-1.40+0.016ARC+0.34MO+3.86Fe$	0.8525	0.1087	0.0000	87.0757	99	Arcilla
<b>Cr</b>	$131.18-2.56ARC-1.69MO-2.30Fe$	0.0154	0.4833	0.6398	27.531	90	Hierro
<b>Cu</b>	$0.003+0.00004ARC+0.001MO+0.002Fe$	0.8911	0.0665	0.1689	36.6359	95	Arcilla
<b>La</b>	$19.91+0.08ARC-1.02MO+5.86Fe$	0.8117	0.2128	0.0018	42.0578	95	Arcilla
<b>Mn</b>	$161.25+1.88ARC-5.53MO+106.01Fe$	0.7749	0.6868	0.0042	38.0883	95	Arcilla
<b>Ni</b>	$-2.71-0.04ARC+1.47MO+6.84Fe$	0.8728	0.0222	0.0000	77.5890	99	Arcilla
<b>Pb</b>	$17.04+0.08ARC+0.41MO+3.96Fe$	0.7433	0.4924	0.0036	45.6913	99	Arcilla
<b>Sc</b>	$0.47+0.04ARC+0.05MO+2.60Fe$	0.0756	0.2948	0.0000	98.0368	99	Materia orgánica
<b>Ti</b>	$0.12-0.002ARC-0.008MO+0.05Fe$	0.6484	0.3481	0.0058	38.2953	95	Arcilla
<b>V</b>	$-9.61+0.12ARC+0.86MO+21.82Fe$	0.6218	0.1675	0.0000	95.7732	99	Arcilla
<b>Zn</b>	$-2.68+0.62ARC+3.67MO+14.37Fe$	0.2807	0.0158	0.0001	72.0913	99	Arcilla

A partir de lo expuesto anteriormente, se proponen en esta Tesis unos valores de referencia, los cuales se indican en la Tabla 3.14 junto a los valores establecidos por otros países y comunidades autónomas de España.

Se ha utilizado la media aritmética de las variables edáficas al seguir éstas una distribución normal. En el caso de aquellos elementos que no muestran significación con las variables se ha utilizado el criterio convencional, ya mencionado, para el cálculo del VR.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3.14. Valores de referencia establecidos en Comunidades Autónomas españolas, en otros países y VR propuestos.

	C.A.M.*	C.A.P.V.		HOLANDA		ALEMANIA			VR propuestos	
	VR90	X+2S	VP+aL+bH	Fórmula	Suelo standard	Mult	Agri	X+2S	X+2S	VF+aArc+bMO+cFe
Al		23	11+0.25L	15+0.4(L+H)	29	20	40	15 20 35	9	7
As	10								17	-
Ba									676	413
Ce		28	6+0.5L	20	20	-	-	-	95	60
Co	7	66	25+L	50+2L	100	-	100	-	20	12
Cr	22	31	10+0.5L	15+0.6(L+H)	36	-	-	-	146	76
Cu	14								29	
La									50	32
Mn	404	46	12+L	10+L	35	-	50	-	799	464
Ni	8	76	16+0.7L+2.1H	50+L+H	85	50	100	50 60 70	44	26
Pb	22								45	32
Sc									14	9
Ti	0,26								0.39	0.20
V	25								103	62
Y		136	50+2L	50+1.5(2L+H)	140	120	200	-	19	-
Zn	52								106	72

CAM\*: Valores de referencia generales para suelos de la Comunidad de Madrid (IGME, 2002).

VR90: valor de referencia más bajo de los determinados en cada unidad tipo.

### 3.2. COMPORTAMIENTO DEL SUELO FRENTE APORTES DE NÍQUEL

#### 3.2.1. Introducción

Se ha realizado un supuesto práctico de contaminación, con el fin de estudiar el comportamiento del suelo frente a distintos aportes de níquel.

La elección de níquel, para estudiar el comportamiento de estos suelos frente a aportes antropogénicos de metales y ver su disponibilidad, se ha basado en la baja disponibilidad del Ni en suelos desarrollados sobre serpentinas, en los que este metal de origen litogénico está en gran proporción (más de 1000 mg/kg), frente a suelos en los que, con aportes antrópicos de Ni en la misma concentración y concentraciones superiores o inferiores, la disponibilidad puede llegar a ser muy elevada.

La biodisponibilidad o toxicidad de metales pesados está controlada por reacciones de sorción-desorción en la superficie de los materiales coloidales del suelo. Los procesos de retención por las fases sólidas del suelo se llevan a cabo por diferentes mecanismos: adsorción a la superficie activa de constituyentes minerales y húmicos (cambio iónico y adsorción específica); difusión en las estructuras de minerales primarios y secundarios; y precipitación como carbonatos, hidróxidos y fosfatos (Reed and Cline, 1994). Estos mecanismos dependen de las propiedades del suelo, las cuales pueden variar con el tipo de suelo y por actividades antropogénicas (Veeresh et al., 2003). Los parámetros o “variables master” que controlan la retención y movilidad de contaminantes en suelos (Salomons, 1995) son: contenido en materia orgánica, contenido en minerales de arcilla y naturaleza de estos minerales; contenido en óxidos de hierro y manganeso, y contenido en carbonatos.

Para estudiar la retención de metales en suelos se usan las técnicas de equilibrio en “batch” y los datos de sorción se expresan en isothermas. Los análisis de estas isothermas dan información acerca de la capacidad de retención y de la fuerza mediante la cual el sorbato es retenido por el suelo.

Cuando las isothermas son de tipo L (Giles et.al, 1960) reflejan una relativa afinidad entre el metal y la superficie de los componentes del suelo, e indican quemisorción (en este caso las isothermas presentan una abrupta pendiente inicial que se estabiliza con el incremento en la concentración de equilibrio del metal, dando lugar a una meseta o sección lineal). Si la cantidad de metal sorbido aumenta linealmente con un incremento insignificante en la concentración de equilibrio, mostrando una línea vertical, las isothermas son de tipo H.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Estas isothermas sugieren una interacción muy fuerte entre metal y superficie de los componentes del suelo. Las isothermas que muestran características de tipo L y tipo H se clasifican como L<sub>2</sub>. El orden de afinidad creciente para metales en relación a las isothermas es: L<L<sub>2</sub><H.

El coeficiente de distribución (Kd) de las isothermas de sorción indica la capacidad de un suelo para retener un soluto; se obtiene de la pendiente de la ecuación de regresión lineal y se usa para caracterizar la movilidad de los metales pesados en el sistema suelo (Reedy y Dunn, 1986). El coeficiente de distribución se calcula (Alloway, 1995):

$$kd = \frac{[Metal]_{adsorbido}}{[Metal]_{solución}}, \text{ donde la concentración de metal adsorbido en equilibrio viene dada}$$

en mg de metal por unidad de peso suelo (mg/kg) y la concentración de metal en solución, en equilibrio, por mg de metal por unidad de volumen (mg/l). Bajos valores de Kd indican que la mayor parte del metal presente en el sistema permanece en la solución y está disponible para su absorción por las plantas. Altos valores de Kd reflejan una gran afinidad de los componentes del suelo hacia los metales, contribuyendo a la capacidad de adsorción, tanto la naturaleza de la arcilla como el pH, carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico y contenido en carbonatos (Anderson and Christensen, 1988). Gomes et al (2001), estudiando valores de kd en distintos tipos de suelo a los que añadían diversos metales en sorción competitiva, entre ellos níquel a concentración de 25 mg/l, observaron que los coeficientes de correlación entre kd y parámetros edáficos eran positivos y muy significativos con pH, negativos y no significativos con carbono orgánico, arcilla y óxidos. Morera et al. (2001) observaron que, en general, las isothermas con menores valores de kd coincidían con mayores proporciones de metal de cambio, es decir, que la afinidad de los componentes del suelo hacia los metales era baja.

Veeresh et al. (2003), contaminando suelos de diferente naturaleza con Ni, a concentraciones comprendidas entre 9 mgNi/kg y 180 mg Ni/kg de suelo, obtuvieron isothermas tipo L con un valor Kd = 9 para alfisoles, y de tipo H con un Kd = 329 para vertisoles, siendo en estos suelos, la esmectita, como arcilla dominante, la que condiciona la más alta capacidad de adsorción.

### 3.2 COMPORTAMIENTO DEL SUELO FRENTE APORTES DE NÍQUEL

En este estudio, la sorción-desorción de Ni se llevó a cabo mediante un experimento en “batch” (Amacher et al., 1986), variando la concentración de níquel en suelo con cinco soluciones diferentes de  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ : 1000-500-250-100 y 50 mg/l, para generar niveles en el suelo de 10000, 5000, 2500, 1000 y 500 mg de Ni/kg, utilizando como guía el contenido total en Ni de suelos desarrollados a partir de serpentinas (aproximadamente 1000 mg/kg)..

En los anexos X, XI, XII y XIII se muestran los resultados del estudio de sorción-desorción de los dos muestreos.

#### 3.2.2. Isotermas de sorción

Las figuras 3.15 y 3.16 muestran las isotermas de sorción correspondientes a las muestras IV (primer muestreo) e IG (segundo muestreo).

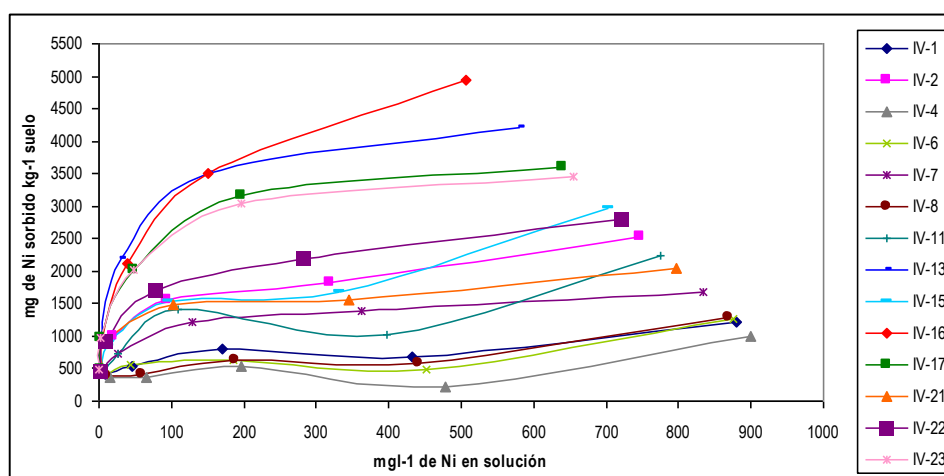


Figura 3.15. Isotermas de sorción de muestras IV

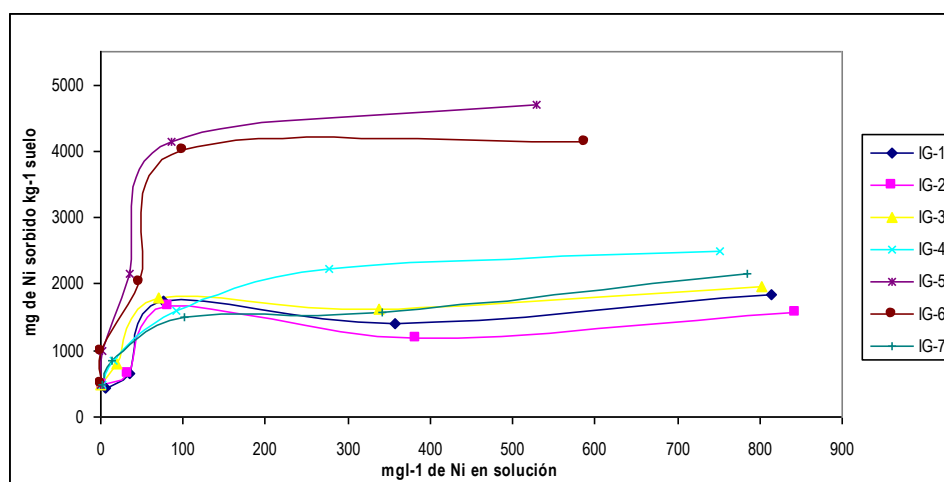


Figura 3.16. Isotermas de sorción de muestras IG



### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las isothermas de sorción de los suelos IV (primer muestreo) son por lo general tipo L, presentando un comportamiento similar. Sin embargo, existen cuatro muestras (IV-13,16, 17 y 23) (anexo X) que se diferencian del resto por presentar una mayor sorción para cualquier concentración de Ni añadida. La afinidad hacia el Ni de estas muestras respecto al suelo estaría controlada por parámetros como pH más elevado, mayor contenido en C orgánico y contenido en arcilla algo más elevado.

En las isothermas de sorción de los suelos IG (segundo muestreo) se diferencian dos muestras IG-5 e IG-6, por presentar mayor sorción que el resto para todas las concentraciones (anexo XI), correspondiendo a isothermas tipo H, lo que sugiere una gran afinidad por el Ni.

A elevadas concentraciones de Ni (10000 mg/kg), estos suelos presentan bajo porcentaje de sorción (26%) (Figura 3.17) debido a las características de los suelos, cuyos componentes no tienen suficiente capacidad de sorción (escasa proporción de arcilla, de tipo illítico y contenido medio en C orgánico), lo que supondría gran riesgo de contaminación ya que quedaría metal en la solución. A concentración de 500 mg/kg, los suelos del primer muestreo son capaces de sorber porcentajes comprendidos entre 71-100% de Ni (Anexo X).

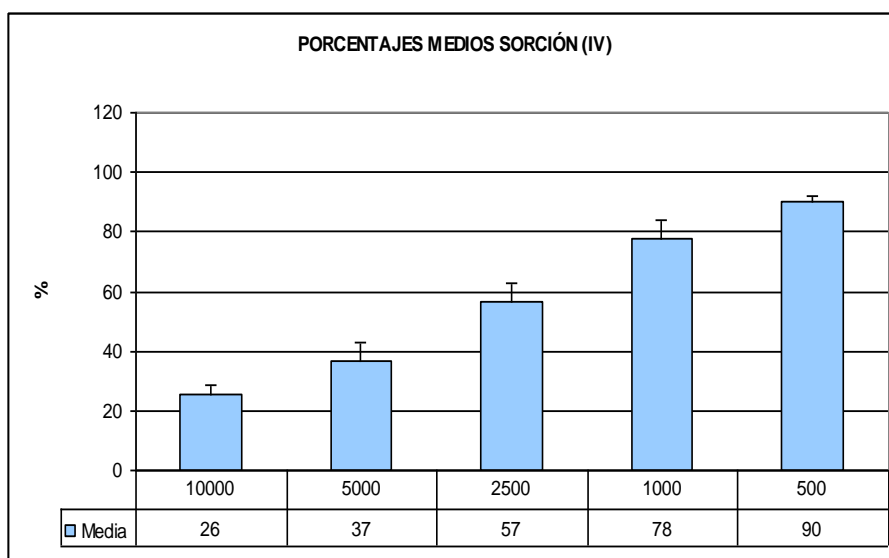


Figura 3.17- Porcentajes medios de sorción. Muestras IV.

### 3.2 COMPORTAMIENTO DEL SUELO FRENTE APORTES DE NÍQUEL

Los porcentajes medios de sorción del segundo muestreo (Figura 3.18) son algo más elevados para todas las concentraciones, consecuencia de valores más elevados en los parámetros edáficos (pH, arcilla y materia orgánica).

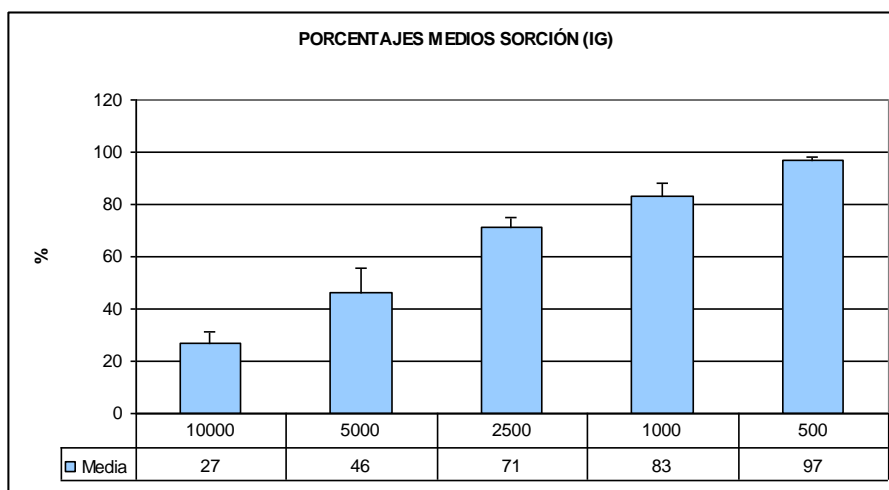


Figura 3.18- Porcentajes medios de sorción. Muestras IG.

#### 3.2.3. Valores de coeficientes de distribución ( $K_d$ )

Los valores medios de  $K_d$  en las isotermas de sorción para suelos del primer muestreo (Tabla 3.15) ponen de manifiesto que al disminuir la concentración de Ni añadido (50 mg/l) se incrementa el valor respecto al obtenido a concentraciones más elevadas, indicando una mayor afinidad hacia el Ni de los componentes del suelo. Sin embargo, existe gran variabilidad en el comportamiento de cada muestra, en función de sus características. Las muestras IV-23, IV-17, IV-16 e IV-13 son las que presentan mayor afinidad a concentraciones de 500, 1000, 2500 y 5000 mg/kg, lo que puede estar condicionado, en parte, por la existencia de carbonatos (sustitución del Ni por el Ca de los carbonatos).

En muestras del segundo muestreo (Tabla 3.16), los valores medios de  $K_d$  incrementan también a menores concentraciones de Ni añadido; sin embargo, se observa mayor afinidad que las muestras del primer muestreo, a concentraciones de 500, 1000 y 2500 mg/kg, condicionada por los parámetros edáficos (pH, materia orgánica y contenido en arcilla).

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3.15. Coeficientes de distribución en muestras IV

	1000	500	250	100	50
IV-1	1	2	5	12	41
IV-2	3	6	17	52	n.d.
IV-4	1	0	3	6	24
IV-6	1	1	3	13	47
IV-7	2	4	9	27	102
IV-8	1	1	3	7	34
IV-11	3	3	13	27	66
IV-13	7	23	71	524	546
IV-15	4	5	16	63	130
IV-16	10	23	54	217	225
IV-17	6	16	42	297	389
IV-20	5	12	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	3	4	14	104	118
IV-22	4	8	21	110	176
IV-23	5	16	42	321	505
<b>Media</b>	4	8	22	127	185

Tabla 3.16. Coeficientes de distribución en muestras IG.

	1000	500	250	100	50
IG-1	2	3	23	19	80
IG-2	1	2	21	20	354
IG-3	2	4	25	40	640
IG-4	3	6	17	58	298
IG-5	8	49	62	598	565
IG-6	6	41	43	1039	4289
IG-7	2	5	15	60	303
<b>Media</b>	3	16	29	262	933

#### 3.2.4. Isotermas y porcentajes de extracción

La extracción de metales en suelos se considera una forma de obtener información asociada a procesos de transferencia entre el suelo y la planta, permitiendo evaluar la biodisponibilidad de los mismos.

Las figuras 3.19 y 3.20 muestran las isotermas de extracción correspondientes a las muestras IV (primer muestreo) e IG (segundo muestreo).

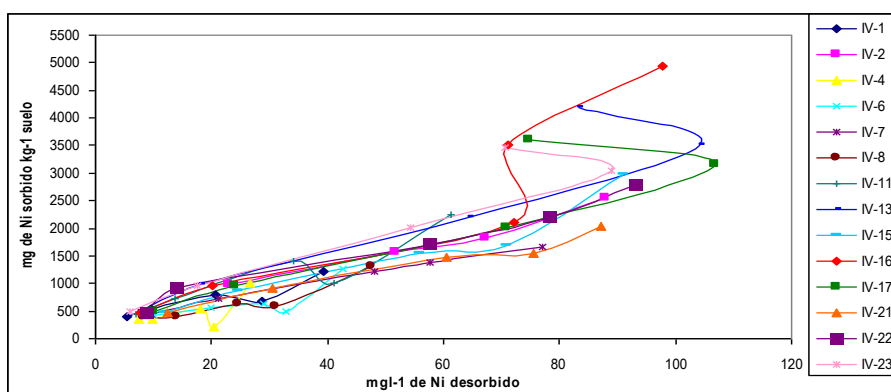


Figura 3.19. Isotermas de extracción de muestras IV

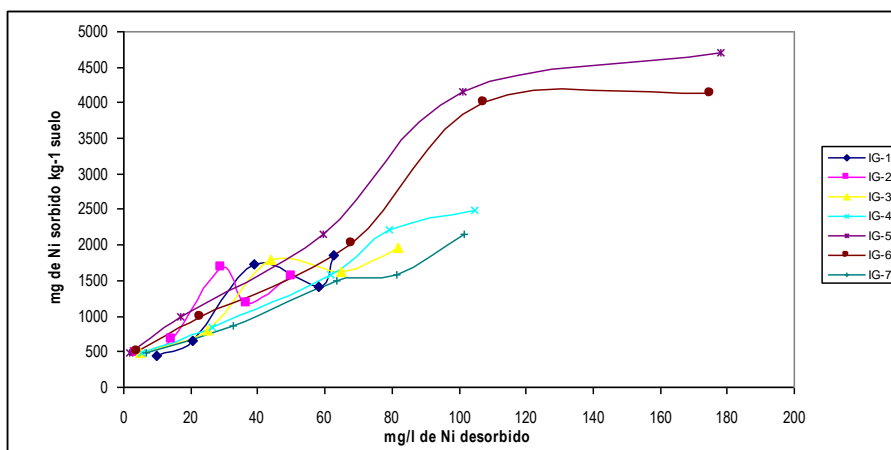


Figura 3.20. Isotermas de extracción de muestras IG

Si se consideran los porcentajes medios de extracción de Ni añadido a distintas concentraciones, en suelos del primer muestreo (IV) (Figura 3.21), se puede ver que al disminuir la concentración añadida (500 mg/kg) el porcentaje de extracción se hace menor, lo que indica que queda Ni fijado en los componentes del suelo, fundamentalmente en la fracción arcilla en posiciones específicas (ya que existe correlación negativa entre arcilla y Ni extraído), liberándose como valor medio un 39% de Ni.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

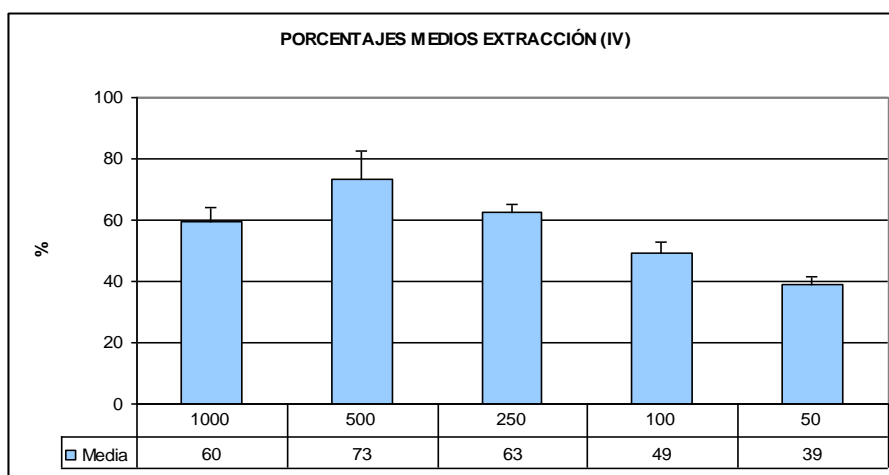


Figura 3.21- Porcentajes medios de extracción. Muestras IV.

A mayores concentraciones de Ni añadido, los porcentajes extraídos son más elevados, por lo que el Ni quedaría no sólo en posiciones específicas, sino que en mayor proporción estaría en posiciones fácilmente extraíbles, por lo que el posible riesgo de contaminación a otros ecosistemas será mayor.

Se debe resaltar que el porcentaje medio de extracción a una concentración de 5000 mg/kg de Ni añadido es superior que el obtenido a una concentración de 10000 mg/kg, lo que ha sido debido a un error metódico.

Los suelos del segundo muestreo (IG) se comportan al añadir las distintas concentraciones de Ni, de modo similar a los del primer muestreo, es decir, al disminuir la concentración añadida, el porcentaje medio de extracción disminuye como consecuencia de quedar fijado el metal (Figura 3.22).

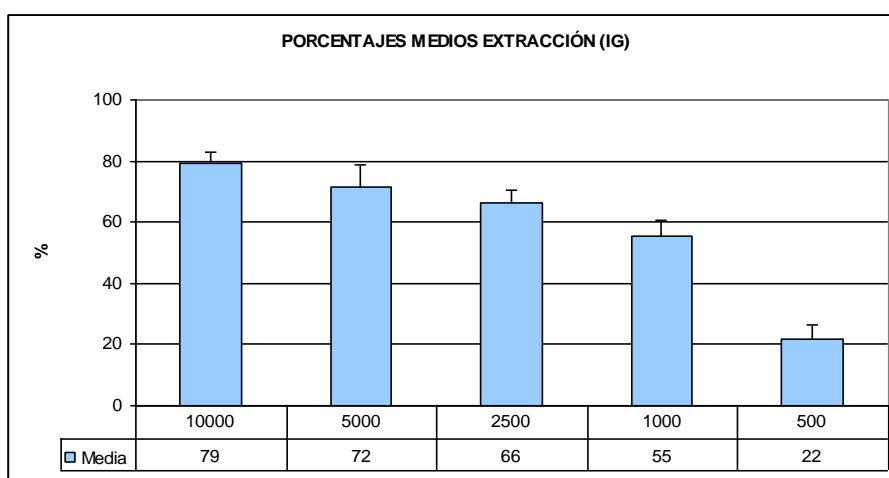


Figura 3.22- Porcentajes medios de extracción. Muestras IG.

#### 3.2.5. Correlación entre Ni sorbido-extraído y parámetros edáficos

La fracción arcilla sorbe Ni a cualquier concentración añadida (correlaciones significativas y positivas) (Tabla 3.17), sin embargo, lo desorbe cuando es aportado a concentraciones de 10000-5000 y 2500, es decir, retiene Ni en forma cambiante (correlaciones positivas y significativas). A una concentración de 1000 mg/kg, la correlación entre la arcilla y lo extraído no es significativa, lo que indica que, en parte, quedará fijado. A una concentración de 500 mg/kg, la correlación es negativa aunque no es significativa.

La arena fina se comporta de forma inversa a la arcilla, apenas sorbe Ni, pero tiende a liberarlo cuando la concentración de Ni añadida es baja.

El carbono orgánico no parece tener mucha influencia en la sorción de Ni (no existe correlación). La ausencia de correlación entre el contenido en materia orgánica total del suelo y la sorción de metales se podría atribuir al hecho de que la fracción reactiva (ácidos fúlvicos, húmicos) de la misma no estaría valorada en esta relación (McBride et al., 1997). Sin embargo, la materia orgánica puede formar complejos organometálicos muy estables con el Ni, sobre todo cuando la concentración añadida de Ni es de 1000 mg/kg, ya que no se puede extraer el elemento totalmente con el reactivo empleado (correlación muy significativa y negativa), aunque también estaría ocupando posiciones de cambio (50% de Ni extraído).

El papel del pH es fundamental en la sorción-desorción de Ni. Las correlaciones son muy significativas y positivas tanto con Ni sorbido como extraído. El pH puede actuar precipitando un elemento o disociando grupos funcionales e incrementando cargas variables negativas de los minerales de la arcilla y materia orgánica, con lo cual contribuiría a la sorción de Ni, pero, al mismo tiempo, el elemento estaría ocupando posiciones de cambio y sería factible su liberación. Cuando la concentración es muy baja quedaría fijado en posiciones específicas.

El Ni está asociado a los óxidos de Fe cristalino en estos suelos naturales no contaminados ( $r=0,711^{**}$ ), sin embargo, al aportar este elemento como contaminante, las correlaciones son negativas y significativas, es decir, no son estos óxidos contribuyentes fundamentales en la sorción de Ni. No obstante, existen correlaciones muy significativas y negativas entre Ni extraído y óxidos cristalinos de Fe cuando el elemento es añadido a concentraciones, 10000, 5000 y 2500 mg/kg, lo que hace suponer que queda fijado en superficie por sustitución isomórfica del Fe por Ni. A concentraciones más bajas las correlaciones no son significativas.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los óxidos de Fe amorfo asociados a la materia orgánica ( $r=0,457$ ) ejercen poca influencia en la sorción de Ni, sin embargo, son capaces de fijarlo cuando se añade a concentraciones de 5000 y 2500 mg/kg.

Tabla 3.17. Correlaciones entre Ni sorbido-extraído y parámetros edáficos

		Concentración de Ni aportada (mg/kg)				
		10000	5000	2500	1000	500
Arcilla	Ni sorbido	0.485*	0.559**	0.499*	0.458*	0.490*
	Ni extraído	0.446*	0.618*	0.540*	0.324	-0.114
Arena fina	Ni sorbido	-0.262	-0.386	-0.526*	-0.391	-0.528*
	Ni extraído	-0.376	-0.424*	-0.297	-0.136	0.449*
C orgánico	Ni sorbido	0.063	-0.029	0.000	-0.120	-0.184
	Ni extraído	-0.210	-0.291	-0.334	-0.718***	-0.413
pH agua	Ni sorbido	0.740***	0.766***	0.742***	0.794***	0.735***
	Ni extraído	0.714***	0.860***	0.934***	0.656**	0.020
Fe cristalino	Ni sorbido	-0.498*	-0.574*	-0.391	-0.500*	-0.366
	Ni extraído	-0.623**	-0.627**	-0.633**	-0.369	0.244
Fe amorfo	Ni sorbido	-0.458*	-0.448	-0.353	-0.438	-0.223
	Ni extraído	-0.350	-0.620**	-0.658**	-0.380	-0.482*

\* La correlación es significativa al nivel 0,05.

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01.

\*\*\* La correlación es significativa a un nivel 0,001.

Los valores de Ni extraídos con acetato amónico, en muestras naturales de los suelos estudiados, vienen expresados en la tabla 3.18.

Los porcentajes de extracción de Ni en suelos del primer muestreo (IV) y segundo muestreo (IG) sin contaminar, contaminados con Ni a 1000 mg/kg, y suelos procedentes de serpentinas con contenidos en Ni próximos a 1000 mg/kg, se expresan en la tabla 3.19.



### 3.2 COMPORTAMIENTO DEL SUELO FRENTE APORTES DE NÍQUEL

Tabla 3.18. Contenidos de Ni ( $\mu\text{g/kg}$ ) extraídos en muestras sin contaminar.

Perfil	NÍQUEL ( $\mu\text{g/kg}$ )
IV-1	11,025
IV-2	10,725
IV-4	7,125
IV-6	5,325
IV-7	5,025
IV-8	3,675
IV-11	55,425
IV-13	4,65
IV-15	4,275
IV-16	n.d.
IV-17	1,8
IV-20	n.d.
IV-21	2,925
IV-22	1,5
IV-23	3,45
IG-1	6,525
IG-2	3,975
IG-3	3,525
IG-4	1,8
IG-5	2,4
IG-6	3,9
IG-7	3,825

Tabla 3.19- Porcentajes de Ni extraído en los suelos estudiados sin contaminar, contaminados con 1000 mg/kg de Ni y en suelos formados sobre rocas ultrabásicas (serpentinadas).

		Contenidos en Ni (mg/kg)	% Extracción
Suelos sin contaminar	Suelos IV (Primer muestreo)	21,8	0,02
	Suelos IG (Segundo muestreo)	12,1	0,02
Suelos contaminados	Suelos IV (Primer muestreo)	1000	49
	Suelos IG (Segundo muestreo)	1000	55
Suelo sobre serpentina		990	0,36

Se pone de manifiesto la diferente disponibilidad del metal cuando es de origen litogénico (muestras IV, IG y suelos sobre serpentinadas), cuyo porcentaje de extracción es de 0,02-0,36%, mientras que si el origen es antropogénico (suelos contaminados con similar concentración a la existente en los de serpentinadas), el porcentaje de extracción es 49-55%, lo que pone en evidencia el enorme riesgo existente de transferencia a otros compartimentos del sistema.

#### 3.3. ESTUDIO DE LAS AGUAS

##### 3.3.1. Consideración preliminar

La composición de un agua varía como consecuencia de una serie de reacciones que tienen lugar en el medio ambiente y, por tanto, puede dar información sobre la influencia del material litológico, edáfico y actividades antropogénicas con los que el agua ha estado en contacto.

La composición del agua superficial está determinada por su interacción con el sustrato rocoso de la cuenca, el suelo o zona no saturada, de dónde mayoritariamente extrae el agua sus componentes, y por su velocidad de circulación. La composición del agua subterránea está determinada por estos mismos factores multiplicados por el periodo de residencia en la formación acuífera.

La cuenca del río Jarama se sitúa entre el límite del sector nororiental del Sistema Central, formado por rocas metamórficas, deformadas durante la Orogenia Hercínica y atravesadas por granitoides, sin y postectónicos, de origen profundo, y la depresión del Tajo, de origen tectónico-erosivo, rellena de sedimentos detríticos, químicos y de transición entre ambos, que se distribuyen según un diseño concéntrico que coincide con el de una cuenca intramontañosa típica de clima árido y cálido. El límite entre ambas coincide con un accidente tectónico, reflejo intracontinental de los empujes lejanos de África contra Eurasia e Iberia durante la Orogenia Alpina. A este límite se adosa una delgada banda deformada de materiales arenoso-margoso-carbonáticos, restos que atestiguan el alcance sobre el Macizo Hespérico de la transgresión marina del Cretácico superior, antes del inicio de esta Orogenia.

Desde el punto de vista hidrogeológico, en la cuenca del río Jarama existen dos sistemas acuíferos principales: los materiales de Facies Detríticas, que se extienden desde el borde de la “Sierra” hasta Madrid, y los materiales en Facies Química, karstificados, que se extienden al sureste de Madrid. Estos sistemas acuíferos se encuentran separados por materiales impermeables en Facies de Transición. Sobre estas unidades se disponen los materiales cuaternarios, que ocupan los fondos de valle (López et al, 1977).

Los materiales del Terciario y Cuaternario, que rellena la fosa tectónica del Tajo al pie del Sistema Central, constituyen acuíferos que actúan como verdaderos embalses de regulación de los cursos fluviales.

La litología del Terciario (Figura 3.23) está constituida por una Facies Detrítica, en la mitad norte y colindante con la Sierra, formada por gravas, arenas arcósicas, arenas arcillosas, limos y arcillas, materiales permeables que se extienden al NE y SW al pie de la Sierra con espesor considerable, superando los 1000 metros. El límite superior, la “Sierra”, está constituido por materiales graníticos y metamórficos, a esta escala impermeables; adosados a ellos en sus estribaciones una delgada cobertera de arenas, margas y calizas de edad Cretácica, que constituyen un acuífero de dimensiones más locales.

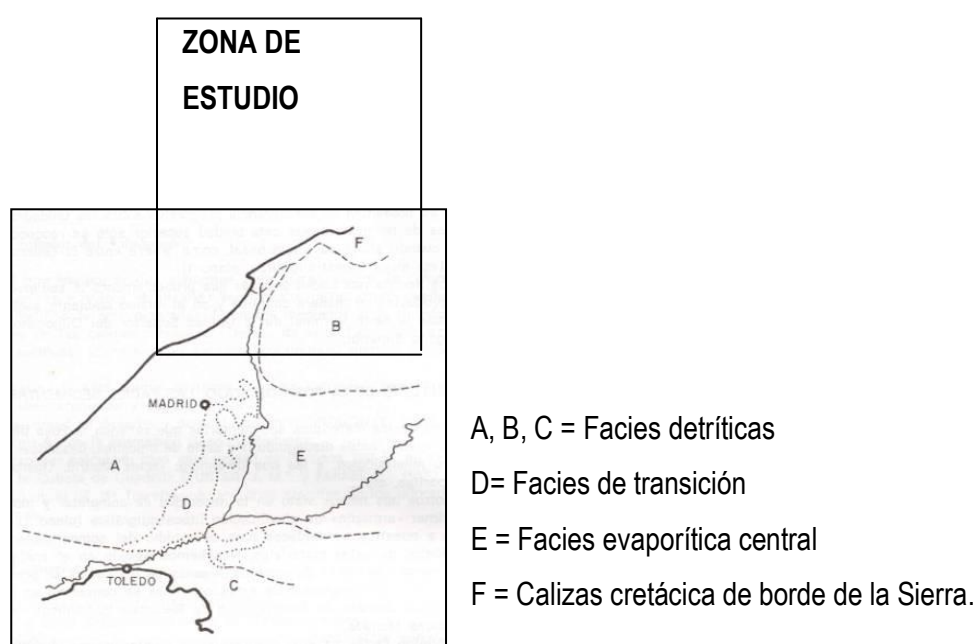


Figura 3.23- Distribución de litofacies en la cuenca de Madrid (López Vera, F. 1994).

En su límite inferior, la Facies Detrítica pasa a la Facies de Transición, formada por una unidad inferior de arcillas y margas, a la que se superpone otra unidad formada por calizas, margas, sílex, sepiolita y algunos niveles arcillosos y arenosos. La unidad inferior arcillosa es impermeable, mientras que la superior es permeable por karstificación.

Los depósitos cuaternarios de interés corresponden a las terrazas del río Jarama y principales afluentes. Litológicamente, las terrazas están formadas por gravas cuarcíticas y arcillas, sobre las que se apoyan materiales procedentes de las vertientes del valle.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La edad de estos materiales es Paleógeno-Neógeno (Figura 3.24)

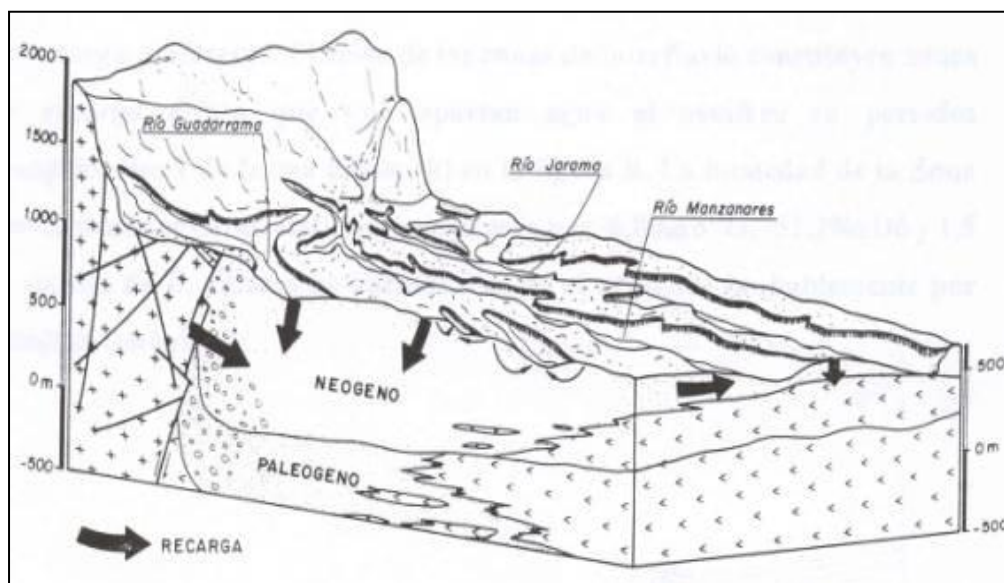


Figura 3.24- Esquema general del acuífero indicando las zonas de recarga (López Vera, F., 1994).

Desde un punto de vista hidrogeológico es importante tener en cuenta el tiempo de residencia, el flujo (o cambios de flujo) y las características de la procedencia del agua analizada, con el fin de demostrar cómo adquiere el agua su composición y describir los procesos que van a modificar esta composición (apartado 1.5.2.4).

El estudio de la calidad del agua destinada a ser consumida por el hombre supone tener en cuenta distintas características del agua (físico-químicas, bacteriológicas, biológicas y radiactivas) y que se cumplan los criterios de calidad establecidos para cada una de ellas.

Para determinar la calidad química de las muestras, se han tenido en cuenta criterios físico-químicos y radiactivos conforme a la Reglamentación Técnico Sanitaria para aguas de bebida envasada (RD 1744/2003). Mediante el estudio estadístico de los resultados se ha evaluado la homogeneidad de las variables y casos, así como sus relaciones.

## 3.3.2. Caracterización física y composición química:

Las tabla 3.23 y 3.25 muestran los resultados obtenidos de los principales componentes y determinaciones físico-químicas, junto con el balance iónico. Las Tablas 3.24 y 3.26 muestran los estadísticos correspondientes a los resultados obtenidos.

Los anexos XIV y XV muestran la composición química cuantitativa y los correspondientes balances iónicos de las muestras de agua del primer y segundo muestreo.

A partir de los parámetros químicos estudiados puede deducirse, mediante el programa Aquachem 4.0, el tipo de agua correspondiente a las aguas estudiadas (Tablas 3.20 y 3.21).

Tabla 3.20. Tipología de las aguas, mineralización, conductividad y dureza.

PRIMER MUESTREO	TIPO DE AGUA	Mineralización (mg/l)	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Dureza total (mg/l $\text{CaCO}_3$ )
IV-3	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub> -NO <sub>3</sub>	0.20	22	0
IV-5	Na-Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> -Cl	0.36	19	5
IV-9	Na-Ca-Cl	1.47	85	0
IV-10	Ca-HCO <sub>3</sub>	2.54	52	67
IV-12	Ca-HCO <sub>3</sub>	2.95	40	89
IV-14	Ca-Mg-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	9.12	508	70
IV-18	Ca-Mg-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	9.33	590	69
IG-1	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub>	1.23	66	6
IG-2	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	7.48	333	106
IG-3	Na-Ca-Cl-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	3.18	154	39

Tabla 3.21. Tipología de las aguas, mineralización, conductividad y dureza.

SEGUNDO MUESTREO	TIPO DE AGUA	Mineralización (mg/l)	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Dureza total (mg/l $\text{CaCO}_3$ )
IV-3	Na-Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	0.66	29	16
IV-5	Ca-HCO <sub>3</sub>	2.76	46	73
IV-10	Ca-HCO <sub>3</sub>	3.48	48	89
IV-12	Ca-HCO <sub>3</sub>	3.85	51	105
IV-14	Ca-Mg-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	8.96	377	122
IV-18	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	10.98	446	141
IG-2	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	7.79	325	147
IVG-1	Ca-HCO <sub>3</sub>	2.58	55	67

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los materiales litológicos relacionados con las aguas vienen dados en la Tabla 3.22, obtenidos del Mapa Geológico de España, a escala 1:200.000.

Tabla 3.22. Muestras de agua, ubicación y sustrato geológico.

MUESTRA	UBICACIÓN	SUSTRATO GEOLÓGICO
IV-3 (río Jarama)	Hayedo de Montejo	Neises y esquistos preordovícicos
IV-5 (río Jarama)	La Morra (Prádena del Rincón).	Esquistos y cuarcitas Ordovícico inferior
IV-9 (agua de escorrentía)	Puerto de la Puebla	Esquistos y cuarcitas Ordovícico inferior
IV-10 (arroyo de La Puebla)	Tejera Parque Avellanos	Esquistos y cuarcitas. Ordovícico inferior
IV-12 (río Riato)	Reserva Nacional	Pizarras y areniscas Ordovícico medio-superior
IV-14 (río Jarama)	Cercano a Uceda	Arenas, gravas y limos (terrazas) Plioceno-Pleistoceno
IV-18 (río Jarama)	Talamanca del Jarama	Gravas, arenas y limos (aluviones) Holoceno
IG-1 (agua de escorrentía)	Atazar	Pizarras y areniscas. Ordovícico medio-superior
IG-2 (río Guadalix)	San Agustín de Guadalix	Gravas, arenas y limos (aluviones) Holoceno
IG-3 (arroyo Tejada)	Colmenar Viejo	Granitos variscos y prevariscos
IVG-1	Atazar	Pizarras y areniscas Ordovícico medio-superior

En un análisis químico de un agua debe verificarse que la suma de miliequivalentes de aniones es igual a la suma de miliequivalentes de cationes:

$$r(\text{aniones}) = r(\text{cationes}) \quad r = \text{meq/l}$$

El porcentaje de error del balance iónico viene dado por la fórmula:

$$\text{Error (\%)} = 200 (\sum \text{cat} - \sum \text{an}) / (\sum \text{cat} + \sum \text{an})$$

El error admisible dependerá de la concentración y tipo de agua, pero a título indicativo puede establecerse (modificado de Anderson, 1966, pág.54):

<b>Conductividad <math>\mu\text{S/cm}</math></b>	50	200	500	2000	>2000
<b>Error admisible (%)</b>	30	10	8	4	4

Los porcentajes de error obtenidos en los balances iónicos de cada una de las muestras se encuentran dentro del valor admisible.





### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3.23. Contenido en aniones y cationes (mg/l) y balance iónico. Primer muestreo.

	pH	CE	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SiO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
IV-3	8,0	22	<0,1	0,96	<0,02	1,68	<0,2	1,39	6,0	0	0
IV-5	8,0	19	<0,1	0,97	<0,02	1,40	<0,2	1,41	5,4	5	0
IV-9	7,7	85	<0,1	23,3	<0,02	<0,20	<0,2	1,36	1,9	0	0
IV-10	8,4	52	<0,1	4,83	<0,02	0,32	<0,2	1,26	6,2	61	3
IV-12	9,0	40	<0,1	0,94	<0,02	<0,2	<0,2	2,42	6,0	77	6
IV-14	7,8	508	<0,1	5,70	<0,02	1,14	<0,2	150	8,6	70	0
IV-18	7,9	590	<0,1	8,02	<0,02	1,85	<0,2	171	5,2	69	0
IG-1	7,5	66	0,11	11,5	0,022	<0,2	<0,2	7,21	5,8	6	0
IG-2	7,3	333	0,21	18,5	<0,02	10,95	0,88	52	12,4	106	0
IG-3	7,3	154	0,39	12,9	<0,02	7,52	1,05	15,7	13,2	39	0
	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Σa	Σc	ε(%)	
IV-3	0,76	0,24	0,64	0,25	0,12	0,138	<0,010	0,09	0,11	13	
IV-5	1,54	0,40	1,38	0,48	<0,05	0,081	<0,010	0,17	0,19	12	
IV-9	9,81	0,77	5,08	1,04	<0,05	0,035	<0,010	0,68	0,79	14	
IV-10	2,68	0,72	20,2	1,52	<0,05	0,056	<0,010	1,27	1,27	0,09	
IV-12	1,21	0,41	24,5	1,46	<0,05	0,062	<0,010	1,54	1,41	-9	
IV-14	4,85	0,77	62,2	16,1	<0,05	0,116	0,033	4,46	4,66	4	
IV-18	4,69	0,75	60,1	13,8	<0,05	0,094	0,024	4,97	4,36	-13	
IG-1	4,91	0,17	6,38	1,45	<0,05	<0,020	<0,010	0,57	0,66	14	
IG-2	16,9	5,23	45	9,41	<0,05	0,094	<0,010	3,58	3,90	8	
IG-3	10,9	3,92	16	3,87	<0,05	0,128	<0,010	1,49	1,69	12	

CE: Conductividad eléctrica en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 25°C

Σc: suma de cationes

ε: error =  $200 (\Sigma a - \Sigma c) / (\Sigma a + \Sigma c)$

Σa: suma de aniones

Tabla 3.24. Parámetros estadísticos de compuestos mayoritarios. Primer muestreo.

	pH	CE	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SiO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>
n	10	10	10	10	7	10	10	10	10	10	10	10	9
máx	9,00	590	0,264	23,28	10,95	171,28	13,20	106	16,92	5,23	62,22	16,06	0,140
X	7,89	187	0,240	8,77	3,55	40,43	7,07	43	5,83	1,34	24,16	4,93	0,089
mín	7,30	19	0,109	0,94	0	1,26	1,90	0	0,76	0,17	0,64	0,25	0,010
s	0,52	213	0,14	7,74	4,04	65,47	3,43	38,56	5,19	1,75	23,60	5,92	0,030
m	7,85	75,50	0,21	6,86	1,68	4,82	6,00	50,00	4,77	0,74	18,09	1,49	0,094
p <sub>75</sub>	8,00	288,25	0,30	12,57	4,69	42,93	8	69,75	8,59	0,77	39,92	8,03	0,116
p <sub>25</sub>	7,55	43,00	0,16	1,94	1,27	1,40	5,50	5,25	1,83	0,40	5,41	1,14	0,062
m/x	0,99	0,40	0,89	0,78	0,47	0,12	0,85	1,15	0,82	0,55	0,75	0,30	1,05

n: número de muestras; m: Mediana; X: Valor promedio; p<sub>25</sub>: percentil del 25%; p<sub>75</sub>: percentil del 75%; s: Desviación típica

### 3.3 ESTUDIO DE LAS AGUAS

Tabla 3.25. Contenido en aniones y cationes (mg/l) y balance iónico. Segundo muestreo.

	pH	CE	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SiO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
IV-3	7,4	29	<0,10	0,98	<0,02	1,29	1,75	9,5	16
IV-5	7,7	46	<0,10	1,33	<0,02	0,55	2,10	7,7	73
IV-10	7,3	48	<0,10	2,91	<0,02	1,71	2,19	7,7	89
IV-12	7,4	51	<0,10	1,36	<0,02	<0,20	2,42	7,5	105
IV-14	7,4	377	<0,10	7,86	0,021	2,30	100,22	6,4	122
IV-18	7,5	446	<0,10	7,55	0,029	2,72	131,45	6,8	141
IG-2	7,6	325	0,26	16,56	0,020	1,63	37,90	7,0	147
IVG-1	7,3	55	0,10	1,67	0,031	0,45	1,73	7,3	67
	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Σa	Σc	ε(%)
IV-3	2,14	0,82	2,40	0,81	0,087	<0,01	0,35	0,31	-14,88
IV-5	2,20	1,02	24,90	1,05	0,168	<0,01	1,29	1,47	12,75
IV-10	2,24	1,19	32,86	1,06	0,118	<0,01	1,62	1,86	13,79
IV-12	1,23	0,41	35,8	1,65	0,055	<0,01	1,81	2,04	12,07
IV-14	5,53	1,05	66,77	12,08	0,078	<0,01	4,36	4,60	5,44
IV-18	6,41	1,08	82,99	14,57	0,078	<0,01	5,32	5,66	6,12
IG-2	15,44	2,02	49,80	10,53	0,035	<0,01	3,71	4,08	9,40
IVG-1	1,86	0	22,13	0,99	1,900	0,11	1,20	1,38	14,18

CE: Conductividad eléctrica en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 25°C

Σc: suma de cationes

ε: error =  $200 (\Sigma a - \Sigma c) / (\Sigma a + \Sigma c)$

Σa: suma de aniones

Tabla 3.26. Parámetros estadísticos de compuestos mayoritarios. Segundo muestreo.

	pH	CE	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SiO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>
n	8	8	8	7	8	8	8	8	8	8	8	8
máx	7,70	446	17	3,00	131	9,50	147	15,00	2,00	82,00	14,00	1,90
X	7,44	172	5	1,52	34,96	7,49	95	4,63	0,95	39,83	5,34	0,31
mín	7,30	29	1	0	2,00	6,40	16	1,00	0	3,00	1,00	0,04
s	0,13	178	5,43	0,84	52,09	0,93	43,41	4,75	0,59	25,86	5,94	0,64
m	7,42	53,00	2,29	1,63	2,31	7,40	97,00	2,22	1,04	34,83	1,36	0,08
p <sub>75</sub>	7,50	338,00	7,63	2,01	53,44	7,70	126,75	5,75	1,11	54,04	10,92	0,13
p <sub>25</sub>	7,36	47,50	1,35	0,92	2,01	6,95	71,50	2,07	0,72	24,21	1,04	0,07
m/x	1,00	0,31	0,46	1,07	0,07	0,99	1,02	0,48	1,09	0,87	0,25	0,26

n: número de muestras

CE: Conductividad eléctrica en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 25°C

X: Valor promedio

s: Desviación típica

m: Mediana

p<sub>75</sub>: percentil del 75%

p<sub>25</sub>: percentil del 25%

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos correspondientes a demanda química de oxígeno, cianuros y residuo total se muestran en la tabla 3.27:

Tabla 3.27. Valores obtenidos de oxidabilidad (mg/l de O<sub>2</sub>), sólidos totales disueltos (mg/l) y cianuros (µg/l).

	OXIDABILIDAD		SÓLIDOS		CIANUROS	
	Primer Muestreo	Segundo Muestreo	Primer Muestreo	Segundo Muestreo	Primer Muestreo	Segundo Muestreo
IV-3	1.6	2.2	19.8	22.8	<0.0025	-
IV-5	1.2	2.5	12.0	60.0	<0.0025	-
IV-9	1.0	-	62.0		<0.0025	-
IV-10	1.6	2.2	20.0	63.6	<0.0025	-
IV-12	1.2	1.3	25.6	59.8	<0.0025	-
IV-14	1.3	1.7	384.8	262	<0.0025	-
IV-18	1.2	2.0	443.0	319.2	<0.0025	-
IG-1	3.0	-	486.6		0.98	-
IG-2	6.6	2.7	238.8	210.8	1.55	-
IG-3	7.4	-	121.8	-	3.60	-

El número reducido de muestras objeto de estudio conlleva inevitablemente a una importante incertidumbre de los resultados en cuanto a su heterogeneidad.

La baja mineralización de las aguas ha dado valores de F<sup>-</sup>, BrO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, HPO<sub>4</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y Mn<sup>2+</sup>, inferiores al límite de detección en la mayoría de las muestras.

La presencia de F<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CN<sup>-</sup> y valores de oxidabilidad más elevados en las muestras IG se debe, posiblemente, a su proximidad a núcleos urbanos, agrícolas y ganaderos (Poblado de la Presa de El Atazar, San Agustín de Guadalix y Colmenar Viejo).

Existe un elevado porcentaje en nitrato (39,47% meq/l) en la muestra IV-3, el cual puede deberse a la falta de madurez de esta muestra, mineralización de la cubierta vegetal de suelos próximos o actividades antrópicas. Esta muestra carece de bicarbonato en el primer muestreo mientras que en el segundo muestreo su presencia puede atribuirse a la actividad biológica del suelo.

Los valores de pH obtenidos oscilan entre 7 y 8, a excepción de las muestras del primer muestreo IV-10, con un pH de 8,4, e IV-12 que presenta un valor de pH básico (9,0±0,1), lo que justifica la presencia de carbonatos.

Existe elevada variación en los contenidos de iones mayoritarios en aguas del primer muestreo  $\text{Cl}^-$  (1-23 mg/l)  $\text{NO}_3^-$  (0-11),  $\text{SO}_4^{2-}$  (1-171),  $\text{Na}^+$  (1-17),  $\text{K}^+$  (0,2-5),  $\text{Ca}^{2+}$  (0,6-62) y  $\text{Mg}^{2+}$  (0,2-16). En aguas del segundo muestreo se observa igualmente la misma variación, excepto con  $\text{NO}_3^-$ .

Los valores de *oxidabilidad* (Tabla 3.23) obtenidos se encuentran dentro del rango para aguas potables y naturales (0.23-8.17 mg/l).

Los contenidos en *sólidos totales disueltos* obtenidos son inferiores a 500 mg/l y muestran gran variabilidad de resultados entre ambos muestreos.

La *alcalinidad* de un agua es su capacidad para neutralizar ácidos y representa la suma de todas las bases titulables. La alcalinidad de aguas superficiales depende principalmente de su contenido en carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, por lo que se suele tomar como una indicación de la concentración de estos componentes.

En las muestras analizadas la alcalinidad se debe fundamentalmente al contenido en bicarbonato y en las muestras IV-10 y 12 también a un ligero contenido en carbonato. Los contenidos máximos de bicarbonato (106 y 147 mg/l) corresponden a la muestra IG-2 (río Guadalix) en ambos periodos estacionales (primavera y otoño)

Los contenidos de  $\text{SiO}_2$  están en función de la naturaleza silicatada de los materiales litológicos.

A partir de los resultados obtenidos pueden extraerse una serie de características hidroquímicas:

- El pH de las aguas analizadas es neutro o ligeramente básico (valor medio ponderado = 7,69), como presentan la mayoría de las aguas de origen o tránsito granítico con déficit de aniones, frente a aportes alcalinos, especialmente el calcio.
- El sumatorio de cationes no supera los 5,66 meq/l, frente al sumatorio de aniones inferior a 5,32 meq/l, lo cual indica la falta de “madurez” total de las aguas.
- El contenido en sólidos totales disueltos está comprendido entre 12 y 486  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Aguas relacionadas con rocas ígneas son pobres en sólidos disueltos debido a que su alteración es lenta. La salinidad de las aguas es bastante baja, siendo el valor medio 180  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con desviaciones típicas muy elevadas.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Las muestras IV-14, IV-18 e IG-2 de mayor mineralización se localizan en materiales cuaternarios (aluviales formados por gravas, arenas, limos y arcillas) con valores medios de conductividad de 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Las muestras con menor conductividad se localizan en los materiales terciarios de edad paleozóica (granitos, gneises, pizarras, esquistos...).
- Para casi todos los componentes las desviaciones típicas son muy elevadas, del mismo orden o superior al valor medio.
- La mayoría de las aguas presenta una composición bicarbonatada cálcica y/o sódica, con variaciones importantes en los contenidos en sulfato, bicarbonato, calcio y cloruro. Presentan muy baja mineralización y su composición química está dominada por los contenidos de calcio, magnesio, sulfato y bicarbonato sobre los contenidos de cloruro y sodio.

Ninguno de los parámetros analizados en las muestras supera los valores establecidos en la reglamentación técnico sanitaria: RD 1744/2003, de 19 de diciembre, que modifica el Real Decreto 1074/2002, por el que se regula el proceso de elaboración, circulación y comercio de aguas de bebida envasadas. (BOE nº- 312/2003) (Tabla 3.28).

Tabla 3.28. Parámetros químicos (RD 1744/2003)

PARÁMETRO	VALOR PARAMÉTRICO	NOTAS
Bromato	10 $\mu\text{g}/\text{l}$	Cuando sea posible sin que afecte a la desinfección, se deberá procurar que el valor sea más bajo.
Cianuro	50 $\mu\text{g}/\text{l}$	En las aguas minerales naturales el límite máximo para el cianuro será de 70 $\mu\text{g}/\text{l}$ .
Fluoruro	1,5 $\text{mg}/\text{l}$	
Nitrato	50 $\text{mg}/\text{l}$	
Nitrito	0,5 $\text{mg}/\text{l}$	En las aguas minerales naturales el límite máximo del nitrito será de 0,1 $\text{mg}/\text{l}$ .
Amonio	0,50 $\text{mg}/\text{l}$	
Cloruro*	250 $\text{mg}/\text{l}$	Excepto en aguas minerales naturales
Conductividad	2.500 $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 20°C	No se aplicará a las aguas minerales naturales y aguas de manantial carbónicas en origen.
Concentración de iones hidrógeno	$\geq 6,5$ y $\leq 9,5$ unidades de pH	
Sulfato	250 $\text{mg}/\text{l}$	Excepto en aguas minerales naturales.
Sodio	200 $\text{mg}/\text{l}$	Excepto en aguas minerales naturales.
Oxidabilidad	5,0 $\text{mg}/\text{l}$ de $\text{O}_2$	

## 3.3.3. Componentes orgánicos

Se han analizado compuestos orgánicos correspondientes a compuestos orgánicos volátiles (VOC's), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's) y pesticidas (Tabla 3.29):

Tabla 3.29. Contenidos en compuestos orgánicos (µg/l).

	VOC's (µg/L)				PAH's (µg/l)		PESTICIDAS (µg/L)
	C, B, BDC, DBCM	TeCE, TrCE	1,2-DCE	Benceno	Benzo(a)pireno	B(b)F, B(ghi)P, B(k)F, I	
IV-3	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50*	<0,01	<0,1	<0,1
IV-5	1,63	<0,50	<0,50	0,89	<0,01	<0,1	<0,1
IVG-1	8,07	<0,50	<0,50	<0,50*	**	**	<0,1
IV-10	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,01	<0,1	<0,1
IV-12	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,01	<0,1	<0,1
IV-14	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50*	<0,01	<0,1	<0,1
IV-18	5,15	<0,50	<0,50	<0,50	<0,01	<0,1	<0,1
IG-2	10,09	<0,50	<0,50	<0,50	<0,01	<0,1	<0,1

C: cloroformo; B: bromoformo; BDC: bromodichlorometano; DBCM: dibromoclorometano; DCE: dicloroetano

\*: Se detectó por debajo del límite inferior de cuantificación.

\*\*: No se analiza por la aparición de un precipitado en forma de gel tras fase extracción en fase sólida. B(f)F: Benzo(b)fluoranteno; B(ghi)P: Benzo(ghi)perileno; B(k)F: benzo(k)fluoranteno; I: Indeno(1,2,3-cd)pireno. Pesticidas: Heptacloro, Aldrín, Heptacloro Epóxido B, Heptacloro Epóxido A, Dieldrín.

Los valores (Tabla 3.30) establecidos por el Real Decreto anteriormente mencionado para estos compuestos orgánicos son:

Tabla 3.30. Valores paramétricos de compuestos orgánicos analizados (BOE nº 312).

PARÁMETRO	VALOR PARAMÉTRICO (µg/l)	NOTAS
Benceno	1,0	
Benzo(a)pireno	0,010	
1,2-dicloroetano	3,0	
Plaguicidas	0,10	Notas 5 y 6
Hidrocarburos policíclicos aromáticos	0,10	Suma de concentraciones de compuestos especificados en nota 8.
Tetracloroetano y tricloroetano	10	Suma de concentraciones de parámetros especificados
Total trihalometanos	100	Suma de concentraciones de parámetros especificados; nota 9.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nota 5: por "plaguicidas" se entiende: Insecticidas orgánicos, herbicidas orgánicos, fungicidas orgánicos, nematocidas orgánicos, acaricidas orgánicos, algicidas orgánicos, rodenticidas orgánicos, molusquicidas orgánicos, productos relacionados. Sólo es preciso controlar aquellos plaguicidas que sea probable que estén presentes en un suministro dado.

Nota 6: el valor paramétrico se aplica a cada uno de los plaguicidas. En el caso de la aldrina, dieldrina, heptacloro y el heptacloroepóxido, el valor paramétrico es de 0,030 µg/l.

Nota 8: los compuestos especificados son: benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(ghi)perileno, indeno(1,2,3-cd)pireno.

Nota 9: Los compuestos especificados son: cloroformo, bromoformo, dibromoclorometano, bromodichlorometano.

No se han detectado valores superiores a los establecidos en la legislación para ninguno de los compuestos orgánicos analizados. Únicamente se detectan trihalometanos en las muestras IV-5, IV-18, IG-2 e IVG-1.

En la muestra IVG-1 no fue posible realizar el análisis de PAH's al formarse un precipitado en forma de gel tras la extracción en fase sólida. Este hecho posiblemente sea debido a la elevada concentración en hierro, el cual precipitaría en forma de hidróxido.

#### 3.3.4. Contenidos de elementos

Se han determinado los contenidos en elementos minoritarios en las aguas del primer muestreo mediante dos técnicas espectroscópicas: Absorción Atómica y Plasma Acoplado Inductivamente (Tabla 3.31). Dados los bajos contenidos de los elementos analizados en el primer muestreo, en el segundo muestreo sólo se realizó el análisis por Espectroscopía de Absorción Atómica (Tabla 3.32).

Tabla 3.31. Contenidos en elementos determinados por absorción atómica (AA) y plasma acoplado inductivamente (ICP). Primer muestreo.

	As (µg/l)		Ba (µg/l)		Ce (µg/l)		Co (µg/l)		Cr (mg/l)		Fe (µg/l)		La (µg/l)		Mn (µg/l)		Ni (µg/l)		P (µg/l)		Pb (µg/l)		Sb (µg/l)		V (µg/l)		W (µg/l)		Zn (µg/l)	
	AA	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	AA	ICP	AA	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	AA	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP
IV3	<5	4	4	1	1	1	138	1	<10	3	1	15	31.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	29
IV5	<5	0	9	2	0	1	81	1	<10	28	2	5	<5	0	1	0	0	0	0	0	<5	0	1	0	0	0	0	0	0	28
IV9	<5	0	15	3	0	1	35	1	<10	2	1	4	<5	0	1	0	0	0	0	0	<5	0	1	0	0	0	0	0	0	18
IV10	<5	1	67	5	0	1	56	0	<10	11	0	40	<5	0	0	0	0	0	0	0	<5	0	0	0	0	0	0	0	0	15
IV12	<5	2	7	4	0	1	62	1	<10	1	2	11	<5	1	0	0	0	0	0	0	<5	1	0	0	0	0	0	0	0	25
IV14	<5	5	20	4	1	1	116	0	32,6	15	1	16	<5	0	0	0	3	12	12	<5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
IV18	<5	4	24	1	0	1	94	1	24,4	12	2	46	<5	2	0	0	2	26	26	<5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	26
IG-1	<5	5	4	4	1	1	<20	0	<10	4	3	20	<5	3	0	1	24	24	24	<5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	24
IG-2	21,8	16	16	0	1	1	94	1	<10	15	2	279	<5	0	2	1	8	8	8	<5	0	2	1	0	0	0	0	0	0	8
IG-3	<5		8	4	0	0	128	1	<10	5	0	360	<5	11	2	0	17	17	17	<5	11	2	0	0	0	0	0	0	0	17

Absorción atómica: Li < 0,05 mg/l, Cd <0,5 µg/l, Cr < 5µg/l, Se < 5 µg/l, Cu < 0,05 µg/l, Zn < 0,05 mg/l, Hg < 0,5 µg/l.



Los resultados obtenidos por *espectroscopía de absorción atómica* son, en general, inferiores al límite de detección del método.

Se obtienen valores de Sr y Mn, en las muestras IV-14, IV-18, en ambos períodos estacionales. Por otra parte, valores de Mn superiores a 10 µg/l se encuentran en las muestras IV-5, 10, 14, 18, IG-2, analizadas por ICP-AES.

En la muestra IG-2 (río Guadalix) existe un contenido de arsénico superior a 10 µg/l, pudiendo ser resultado de actividades industriales de la zona.

La muestra IV-3 (río Jarama) presenta un contenido de 31,8 µg/l en Pb, valor anómalo ya que las aguas naturales rara vez contienen valores superiores a 5 µg/l. Entre los posibles orígenes del Pb en el agua pueden ser industrial, indicios minerales, minería abandonada, etc.

Los contenidos en hierro varían considerablemente en ambas estaciones. La muestra IVG-1 del segundo muestreo presenta contenidos anómalamente elevados de Fe (1900 µg/l) y Mn (114 µg/l).

Tabla 3.32. Contenidos en elementos determinados por absorción atómica. Segundo muestreo.

	Sr (mg/l)	As (µg/l)	Fe (µg/l)	Mn (µg/l)	Zn (mg/l)
IV-3	<0,5	<5	87	<10	<0,05
IV-5	<0,5	<5	168	<10	<0,05
IV-10	<0,5	<5	118	<10	0,15
IV-12	<0,5	<5	55	<10	<0,05
IV-14	<b>1,30</b>	<5	78	<10	<0,05
IV-18	<b>1,70</b>	<5	78	<10	<0,05
IG-2	<0,5	<b>11</b>	35	<10	<0,05
IVG-1	<0,5	<5	<b>1900</b>	<b>114</b>	0,15

Li < 0,05 mg/l, Cd <0,5 µg/l, Cr < 5µg/l, Se < 5 µg/l, Cu < 0,05 µg/l, Pb < 5 µg/l, Hg < 0,5 µg/l.

Los resultados por *espectroscopía de emisión de plasma* acoplado inductivamente muestran muy bajos o nulos contenidos en los elementos analizados como, por ejemplo, As, Be, Ce, Co, Cr, Cu, La, Ni, Pb, Sb, V y W. Elementos como el Ba y Mn presentan una gran variabilidad de contenidos, únicamente el contenido de zinc es bastante similar en todas las muestras con un valor promedio de 20 µg/l. El contenido de P en las muestras IG-2 e IG-3 se encuentra básicamente en forma de fosfato ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) a consecuencia de actividades agrícolas y ganaderas.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Suelos de la vega superior del Jarama presentan mayores porcentajes de elementos solubles (Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Cr) que en las terrazas del Jarama (Cala et al., 1985).

De acuerdo con el RD 1744/2003, de 19 de diciembre, los valores paramétricos de los diferentes elementos analizados se expresan en la Tabla 3.33:

Tabla 3.33. Parámetros químicos (Parte B, anexo IV, BOE núm.312)

PARÁMETRO	VALOR PARAMÉTRICO	NOTAS
Antimonio	5,0 µg/l	
Arsénico total	10 µg/l	
Bario*	1,0 mg/l	
Cadmio	5,0 µg/l	En las aguas minerales naturales el límite máximo para el cadmio será de 3 µg/l
Cromo	50 µg/l	
Cobre	2,0 mg/l	En las aguas minerales naturales el límite máximo para el cobre será de 1,0 mg/l
Plomo	10 µg/l	
Mercurio	1 µg/l	
Níquel	20 µg/l	
Selenio	10 µg/l	
Hierro*	200 µg/l	
Manganeso	50 µg/l	En las aguas minerales naturales, el límite máximo para el manganeso será de 0,50 mg/l.

## 3.3.5. Características radiactivas:

Se ha determinado la radiactividad en aquellas muestras de mayor mineralización, obteniéndose los siguientes resultados (Tabla 3.34):

Tabla 3.34. Resultados de actividad alfa y beta total (Bq/l)

	Actividad alfa total (Bq/l)		Actividad beta total (Bq/l)	
	Primer Muestreo	Segundo Muestreo	Primer Muestreo	Segundo Muestreo
IV-14	<0.032	<0.025	<0.044	0.029+/-0.021
IV-18	<0.039	0.023+/-0.020	<0.051	<0.043
IG-2	<0.041	0.014+/-0.012	0.131+/-0.045	0.094+/-0.021

En el apartado B del anexo I, Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, sobre los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, se indican los niveles máximos establecidos de 0.1 Bq/l para la actividad alfa total y de 1 Bq/l para la actividad beta total. Los valores obtenidos en las muestras no superan en ningún caso los valores máximos permitidos.

Otro elemento radioactivo legislado es el tritio, cuyo nivel máximo permitido es de 100 Bq/l (850UT), habitualmente utilizado para datar aproximadamente el agua. Es el isótopo natural menos abundante, de cada trillón ( $10^{18}$ ) de átomos de hidrógeno, sólo uno es un átomo de tritio. El contenido natural en el agua de lluvia es de 3 a 10 UT (unidades de tritio) y menor en las aguas subterráneas. En general, no presenta problemas de toxicidad en aguas naturales no contaminadas.

Los resultados obtenidos en las muestras con valores determinables mediante la técnica de centelleo líquido han sido los siguientes (Tabla 3.35):

Tabla 3.35. Unidades de tritio en muestras primer muestreo.

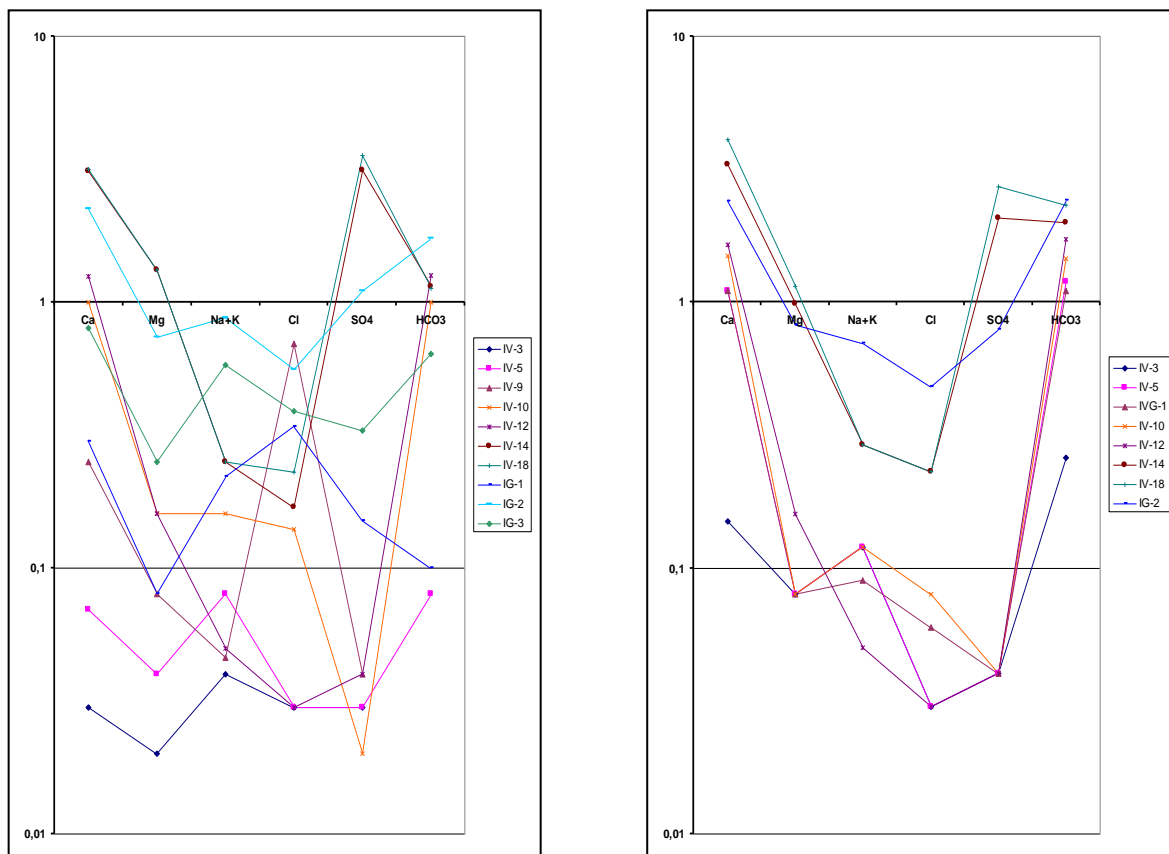
MUESTRA	UNIDADES DE TRITIO
IV-12	9.8 +/- 0.422
IV-14	10.5 +/- 0.423
IG-1	4.7 +/- 0.417
IG-3	1.5 +/- 0.413

Se confirma la baja concentración de tritio en las muestras y, en cualquier caso, los valores isotópicos determinantes están por debajo del límite legal.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.3.5.1.1. Representación gráfica de iones mayoritarios

Una posible interpretación de la composición química de un agua se hace representándola en un diagrama logarítmico vertical (Figuras 3.25 y 3.26), donde se pueden observar diferencias importantes en los contenidos en iones mayoritarios.



Figuras 3.25 y 3.26. Diagramas logarítmicos verticales del primer muestreo y segundo muestreo

Se han comparado los puntos de muestreo tomados en dos períodos estacionales.

En las figuras 3.27, 3.28 y 3.29 se han representando los diagramas logarítmicos de forma individual y con indicación del pH. Se observa que existe una mayor mineralización en las muestras IV-3 e IV-5 tomadas en el segundo muestreo (otoño) y que, sin embargo, el contenido en cloruro permanece estable en ambos períodos.

La mineralización en el resto de muestras es muy similar en ambos períodos, observándose un aumento del contenido en bicarbonato y en calcio en el período otoñal, posiblemente debido a una mayor mineralización de la materia orgánica.

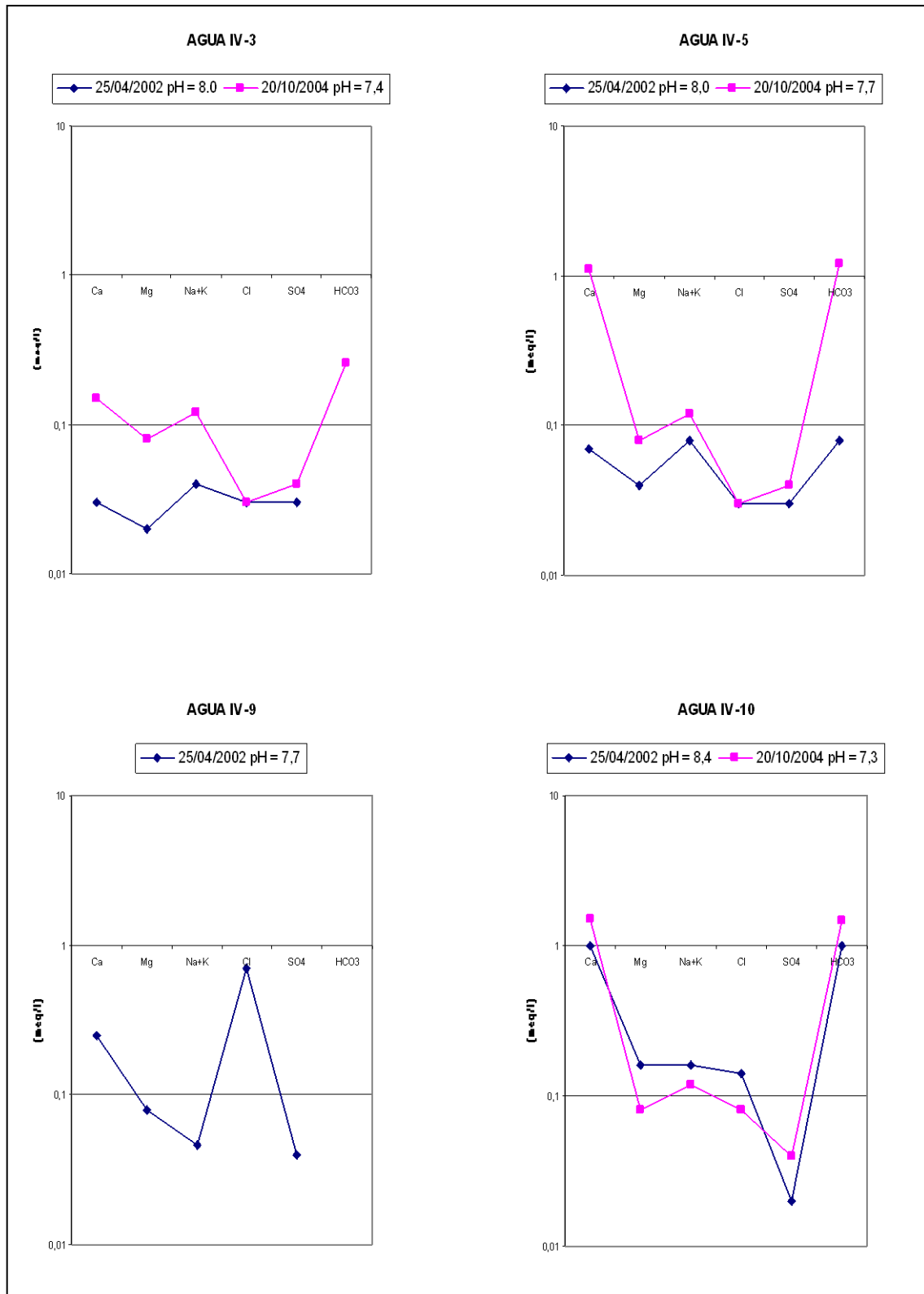


Figura 3.27. Representación en columnas logarítmicas verticales de las muestras de agua de los puntos IV-3, IV-5, IV-9 e IV-10.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

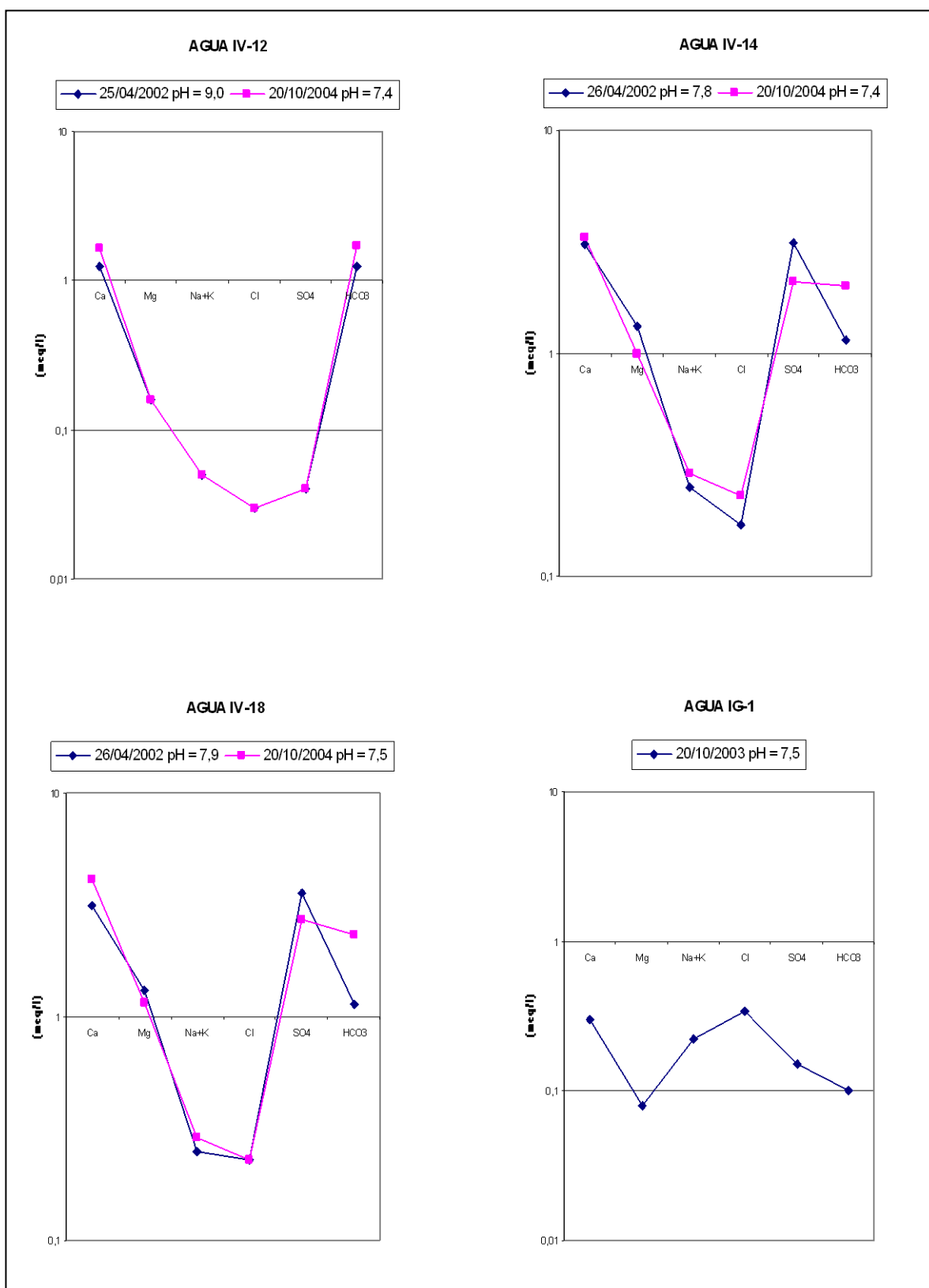


Figura 3.28. Representación en columnas logarítmicas verticales de las muestras de agua de los puntos IV-12, IV-14, IV-18 e IG-1.

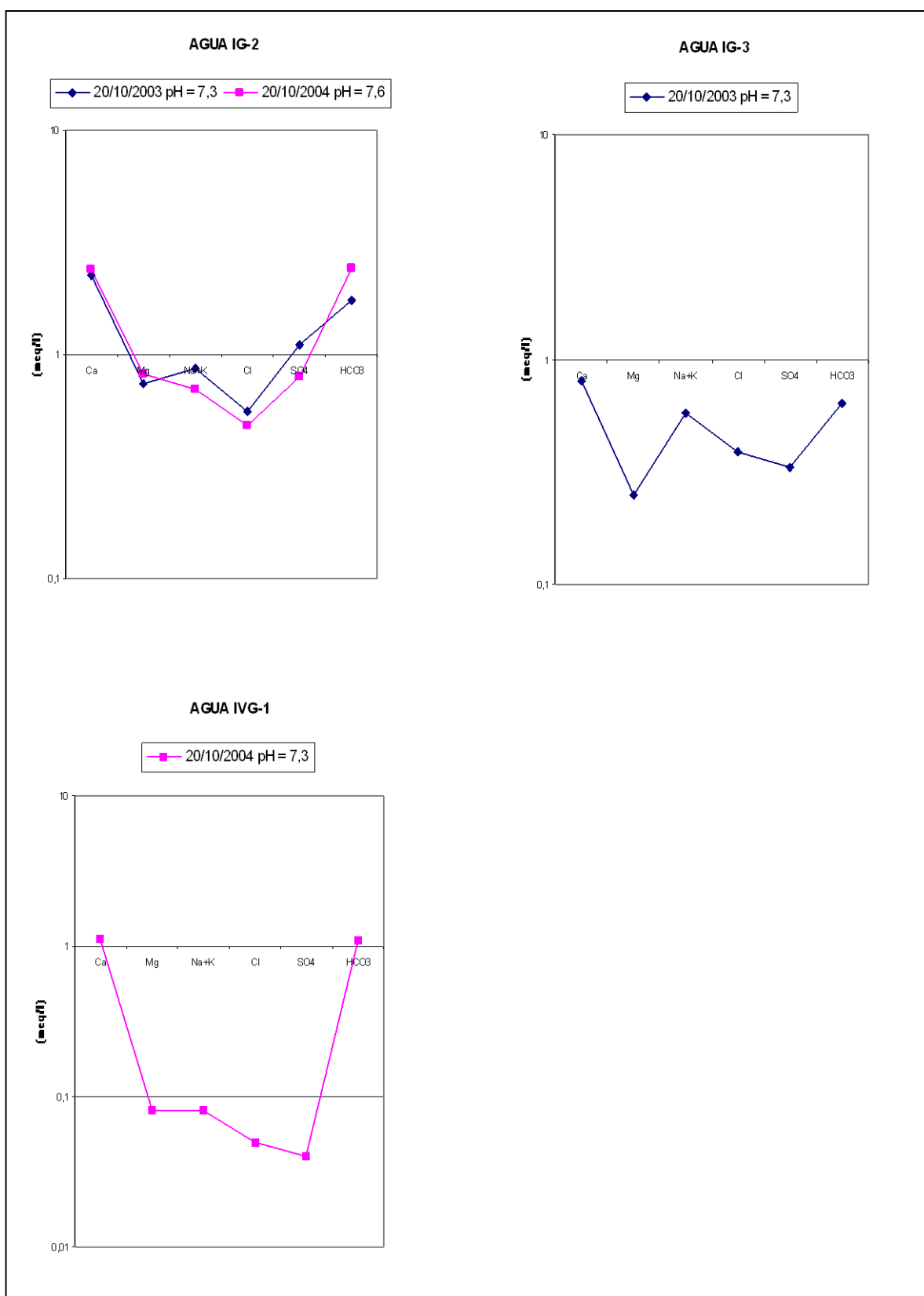


Figura 3.29. Representación en columnas logarítmicas verticales de las muestras de agua de los puntos IG-2, IG-3 e IVG-1

#### 3.3.5.1.2. Relaciones iónicas

Se han determinado algunas de las relaciones iónicas (tablas 3.36 y 3.37) más utilizadas, para comprender las reacciones físico-químicas que afectan a las aguas y que se relacionan directamente con los materiales a través de los que circula el agua y/o con los fenómenos modificadores (la reducción de sulfatos y de hierro, intercambio iónico, fenómenos de oxido-reducción, concentraciones y precipitaciones) de la composición del agua.

- **Relación  $rCl/rSO_4$ :** en aguas poco o moderadamente salinas, la relación puede ser similar a la de la roca acuífera y su valor se mantiene aproximadamente constante al irse concentrando el agua (Custodio, 1974). Las muestras analizadas presentan valores inferiores o próximos a la unidad. Los valores medios son inferiores a los que presenta el agua de mar.
- **Relación  $rNa/rCl$ :** se relaciona con procesos de cambio de bases, debido a que el ión cloruro no se ve afectado por la retención, mientras que el ión sodio sí lo está. Este valor puede verse afectado por la meteorización que afecta a algunos silicatos, los cuales podrían liberar sodio al agua. En el agua de mar la relación tiene un valor aproximado de 0,82 y en el agua de lluvia un valor de 0,86. Los valores de esta relación en las muestras están comprendidos entre 0,65 y 3,00.
- **Relación  $rNa/rK$ :** en agua dulce los valores de esta relación suelen estar comprendidos entre 3 y 250, mientras que en agua de mar varía entre 40 y 50 (Custodio y Llamas, 1983). Los valores más elevados corresponden a las aguas de escorrentía (IV-9 e IG-1). Este valor aumenta aguas abajo en el río Jarama, debido a que el K queda retenido en materiales arcillosos, más abundantes en esa zona.
- **Relación  $rMg/rCa$ :** en las aguas continentales varía frecuentemente entre 0,3 y 1,5. Valores próximos a la unidad indican la posible influencia de terrenos dolomíticos o con serpentina. Valores superiores a la unidad suelen relacionarse con terrenos ricos en silicatos magnésicos. Cuando el  $CaCO_3$  precipita en un agua aumenta la relación, al contrario que cuando se produce disolución de caliza. El agua de mar tiene una  $rMg/rCa$  próxima a 5. Los valores obtenidos en estas aguas son inferiores a la unidad y están comprendidos entre 0,05 y 0,67. Los valores más bajos de esta relación se dan en las muestras IV-10 (arroyo de La Puebla) e IV-12 (Río Riato) relacionadas en los puntos de muestreo con cuarcitas y pizarras de formación rodada.



### 3.3. ESTUDIO DE LAS AGUAS

Tabla 3.36. Relaciones iónicas y estadísticos del primer muestreo.

Muestra	rCl/rSO <sub>4</sub>	rNa/rCl	rNa/rK	rMg/rCa	rSO <sub>4</sub> /rCa
IV-3	1,00	1,00	3,00	0,67	1,00
IV-5	1,00	2,33	7,00	0,57	0,43
IV-9	22,00	0,65	21,50	0,36	0,12
IV-10	4,67	0,86	6,00	0,13	0,03
IV-12	0,60	1,67	5,00	0,10	0,04
IV-14	0,05	1,31	10,50	0,42	1,01
IV-18	0,06	0,87	10,00	0,38	1,19
IG-1	2,13	0,66	52,50	0,38	0,47
IG-2	0,48	1,42	5,69	0,34	0,48
IG-3	1,09	1,31	4,70	0,40	0,41
	rCl/rSO <sub>4</sub>	rNa/rCl	rNa/rK	rMg/rCa	rSO <sub>4</sub> /rCa
N	10	10	10	10	10
Máx	22,00	2,33	52,50	0,67	1,19
X	3,31	1,21	12,59	0,37	0,52
Min	0,05	0,65	3,00	0,10	0,03
S	6,71	0,52	13,82	0,17	0,42
M	1,00	1,15	6,44	0,38	0,45
P <sub>75</sub>	1,87	1,40	10,69	0,42	0,87
P <sub>25</sub>	0,51	0,86	5,41	0,35	0,19
m/x	0,30	0,95	0,51	1,00	0,87

Tabla 3.37. Relaciones iónicas y estadísticos del segundo muestreo.

Muestra	rCl/rSO <sub>4</sub>	rNa/rCl	rNa/rK	rMg/rCa	rSO <sub>4</sub> /rCa
IV-3	0,75	3,00	4,44	0,58	0,30
IV-5	1,00	2,50	3,67	0,07	0,04
IVG-1	1,25	1,60	-	0,07	0,03
IV-10	1,60	1,25	3,20	0,05	0,03
IV-12	0,80	1,25	5,10	0,08	0,03
IV-14	0,11	1,09	8,95	0,30	0,63
IV-18	0,08	1,33	10,09	0,29	0,66
IG-2	0,59	1,43	12,99	0,35	0,32
	rCl/SO <sub>4</sub>	rNa/Cl	rNa/K	rMg/Ca	rSO <sub>4</sub> /Ca
N	8	8	8	8	8
Máx	1,60	3,00	12,99	0,58	0,66
X	0,77	1,68	6,70	0,22	0,26
mín	0,08	1,09	3,20	0,05	0,03
s	0,52	0,69	3,74	0,19	0,27
m	0,78	1,38	5,00	0,18	0,18
p <sub>75</sub>	1,06	1,83	8,67	0,31	0,41
p <sub>25</sub>	0,47	1,25	3,92	0,07	0,03
m/x	1,00	0,82	0,75	0,81	0,69

n: Número de muestras  
 CE: Conductividad eléctrica en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 25°C  
 X: Valor promedio

p<sub>25</sub>: percentil del 25%  
 m: Mediana  
 p<sub>75</sub>: percentil del 75%

s: Desviación típica

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- **Relación  $r_{SO_4/rCa}$ :** el estudio de esta relación tiene como objetivo establecer posibles orígenes del sulfato en un agua subterránea. Los valores están comprendidos, en las muestras, entre 0,03 y 1,00.

#### 3.3.6. Análisis estadístico multivariante

Para la aplicación de los análisis de cluster y de componentes principales ha sido necesaria la normalización de los datos por medio de la transformación logarítmica. Las Figuras 3.30 y 3.32 muestran los diagramas “box&wishker” o de bigotes de la distribución de las distintas variables sin transformación y una vez aplicada la transformación logarítmica, observándose en este último caso una aproximación de las muestras a una distribución de tipo normal (Figuras 3.31 y 3.33).

Los parámetros utilizados para el análisis multivariante han sido:  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $HCO_3^-$  y  $SiO_2$  (mg/l). Del resto de variables se ha prescindido por estar los valores de varias muestras por debajo del límite de detección.

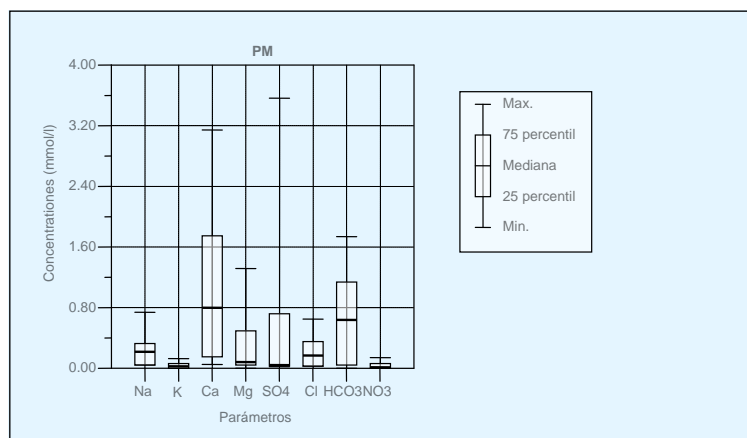


Figura 3.30. Diagrama box-plot de las distintas concentraciones iónicas (mmol/l) de las variables sin transformación logarítmica. Primer Muestreo.

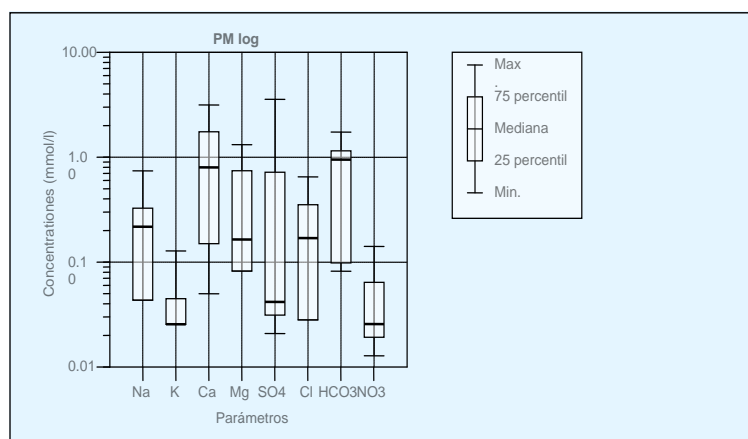


Figura 3.31. Diagrama box-plot de las distintas concentraciones iónicas (mmol/l) de las variables con transformación logarítmica. Primer Muestreo.

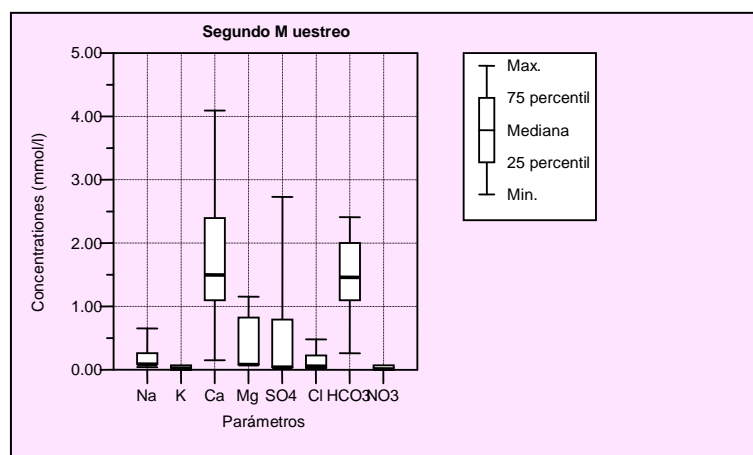


Figura 3.32. Diagrama box-plot de las distintas concentraciones iónicas (mmol/l) de las variables sin transformación logarítmica. Segundo Muestreo.

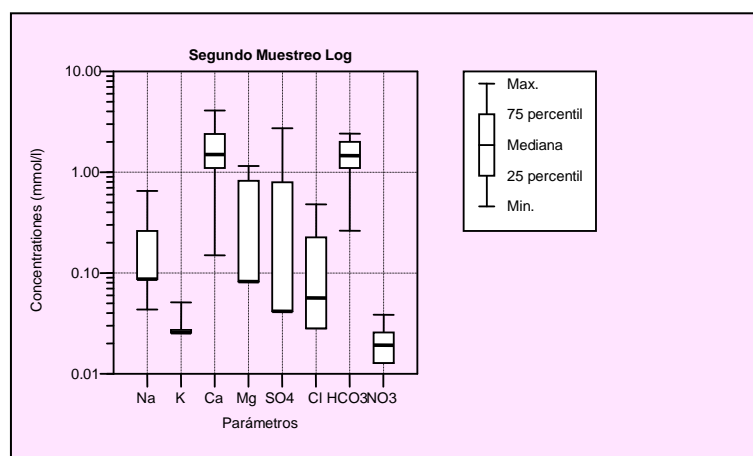


Figura 3.33. Diagrama box-plot de las distintas concentraciones iónicas (mmol/l) de las variables con transformación logarítmica. Segundo Muestreo.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.3.6.1. Análisis de conglomerados

Del mismo modo que en el análisis estadístico de suelos, con esta técnica se busca agrupar los diferentes elementos o variables, tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo. Nos hemos basado en algoritmos jerárquicos acumulativos y en la interpretación de los dendogramas obtenidos.

##### 3.3.6.1.1. Cluster de variables

En el dendograma (Figura 3.34), obtenido para el cluster jerárquico de variables del primer muestreo, queda reflejada la formación de 2 conglomerados principales: uno a menor distancia y formado por las variables Ca, HCO<sub>3</sub>, Mg y SO<sub>4</sub>, correspondientes a los iones predominantes en las muestras analizadas, y otro ligeramente más distante, formado por las variables Na, Cl, K, NO<sub>3</sub> y SiO<sub>2</sub>.

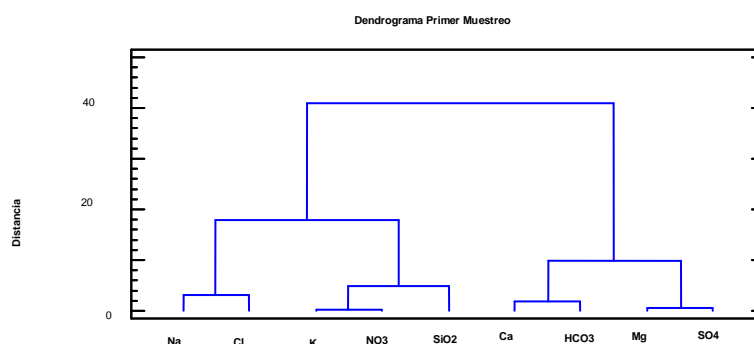


Figura 3.34. Representación del dendograma de resultante del HCA de las principales variables analizadas, empleando el método de agrupación de Ward y la distancia Euclidiana al cuadrado como medida de similitud. Primer muestreo.

La figura 3.35 muestra el dendograma obtenido para el cluster jerárquico de variables del segundo muestreo donde se observa que la variable más distante del resto es la sílice, ya que es la última en incorporarse al cluster final, seguida del nitrato. Por el contrario, las observaciones más cercanas entre sí son el Na y el Cl, que formarían parte del primer grupo, seguidas del sulfato y el magnesio, que forman parte del segundo conglomerado.

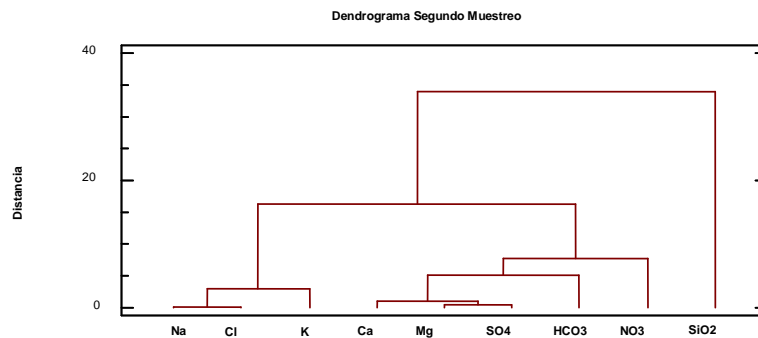


Figura 3.35. Representación del dendrograma de resultante del HCA de las principales variables analizadas, empleando el método de agrupación de Ward y la distancia Euclidiana al cuadrado como medida de similitud. Segundo muestreo.

Los datos así representados indican que estas aguas, muy poco mineralizadas, son principalmente bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas magnésicas.

#### 3.3.6.1.2. Cluster de casos

Se realizó el análisis de cluster de casos utilizando, como matriz de entrada, el cuadrado de la distancia euclidiana y obteniéndose en el primer muestreo y segundo muestreo los siguientes dendogramas (Figuras 3.36 y 3.37).

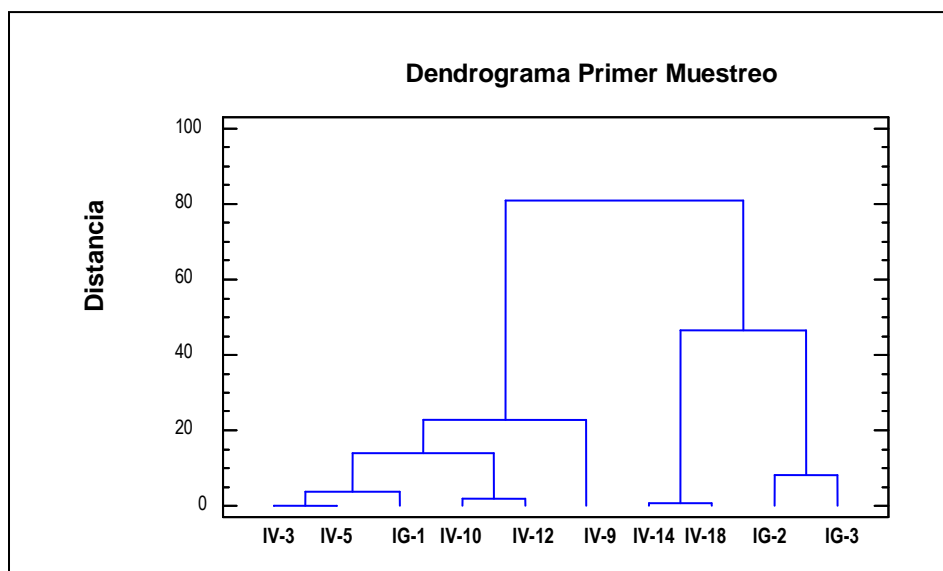


Figura 3.36 - Representación de los dendogramas resultantes del HCA de los casos analizados, empleando el método de agrupación de Ward y la distancia Euclidiana al cuadrado como medida de similitud. Primer muestreo.

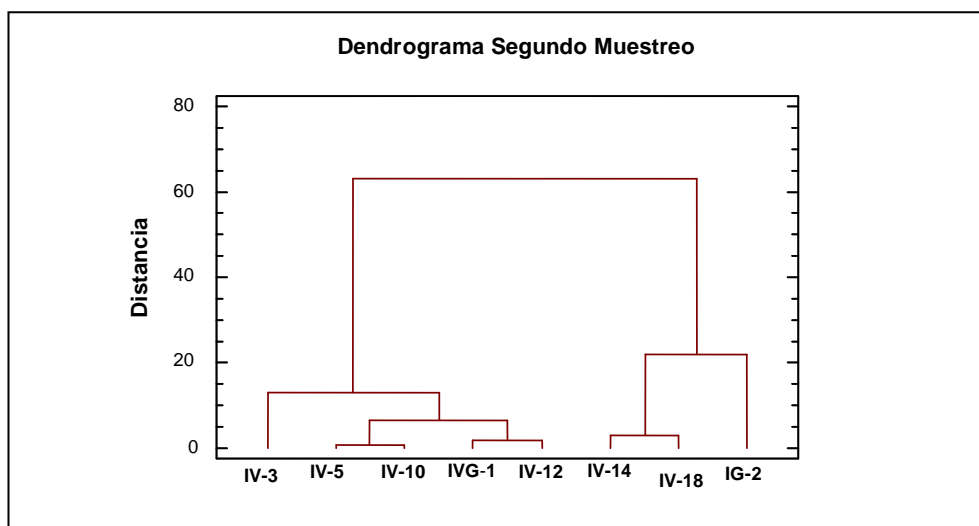
### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observan dos grupos de muestras diferenciados y coincidentes con los materiales geológicos (Figuras 3.40 y 3.41):

- El primer grupo formado por las muestras: IV-3, IV-5, IG-1, IV-10, IV-12 e IV-9, correspondientes a granitos, gneises, micacitas, pizarras, esquistos, etc. de la facies intermedia o de transición.
- Un segundo grupo correspondiente a las muestras IV-14, IV-18, IG-2, situadas sobre aluviales cuaternarios, formados por gravas, arenas, limos y arcillas. La muestra IG-3 aparece incluida debido a que presenta una mineralización similar a este segundo grupo.

De los dendogramas se deduce que las muestras que se encuentran más distantes del resto son las muestras IV-14 y 18 (tomadas en la terraza baja del Jarama), IG-2 y 3 (San Agustín de Guadalix y Colmenar Viejo, respectivamente).

En el primer dendograma las muestras con mayor similitud entre sí son las aguas del río Jarama: IV-3 y 5 (Hayedo de Montejo y Prádena del Rincón, respectivamente), seguidas de las IV-14 (Río Jarama) e IV-18 (Río Jarama); mientras que en el segundo dendograma las muestras con mayor similitud entre sí son la IV-5 (río Jarama) e IV-10 (arroyo de La Puebla), seguidas de la IVG-1 (Atazar) e IV-12 (río Riato).



Figuras 3.37. Representación de los dendogramas resultantes del HCA de los casos analizados, empleando el método de agrupación de Ward y la distancia Euclidiana al cuadrado como medida de similitud. Segundo muestreo.

## 3.3.6.2. Análisis de componentes principales (PC's)

Mediante esta técnica se pretende reducir el número de variables perdiendo la menor cantidad de información posible. Los nuevos componentes o factores principales son una combinación lineal de las variables originales e independientes entre sí.

En primer lugar, se obtienen los valores propios (*eigenvalue*) de cada componente principal, junto con la varianza para cada uno de ellos y la varianza acumulada. En este caso, se han obtenido, en el primer muestreo, 3 componentes o factores principales que juntos suponen el 92,95% de la variabilidad de los datos originales (I: 51,05%, II: 29,64% y III: 12,26%) (Tabla 3.38). En el segundo muestreo son dos el número de componentes principales extraídos, que juntos suponen el 86,26 % de la variabilidad de los datos originales (I: 69,19% y II: 17,06%) (Tabla 3.39).

Tabla 3.38. Análisis de componentes principales. Primer Muestreo.

Componente	Valor propio	Varianza (%)	Porcentaje acumulado
1	4.59465	51.052	51.052
2	2.66763	29.640	80.692
3	1.10303	12.256	92.948
4	0.48242	5.360	98.308
5	0.09971	1.108	99.416
6	0.03465	0.385	99.801
7	0.01322	0.147	99.948
8	0.00406	0.045	99.993
9	0.00064	0.007	100.000

Tabla 3.39. Análisis de componentes principales. Segundo Muestreo.

Componente	Valor propio	Varianza (%)	Porcentaje acumulado
1	6.22743	69.194	69.194
2	1.53580	17.064	86.258
3	0.78888	8.765	95.023
4	0.24637	2.737	97.761
5	0.14254	1.584	99.345
6	0.05581	0.620	99.965
7	0.003173	0.035	100.000
8	5.59E-17	0.000	100.000
9	1.99E-17	0.000	100.000

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez seleccionados los componentes principales, se representan en forma de matriz (correlaciones entre variables y componentes principales) (Tablas 3.40 y 3.41).

En el primer muestreo las variables con más peso sobre la primera componente son, en orden decreciente, el K, NO<sub>3</sub>, Na y SiO<sub>2</sub>, sobre la segunda componente el SO<sub>4</sub>, Ca y Mg y HCO<sub>3</sub>, y sobre la tercera componente el Cl (todas ellas correlaciones positivas).

En el segundo muestreo las variables con más peso sobre la primera componente son el Mg, Ca y HCO<sub>3</sub> (correlación positiva) y sobre la segunda componente el Na y K (correlación negativa).

Tabla 3.40. Correlaciones entre variables y componentes principales (PC). Primer Muestreo.

	PC1	PC2	PC3
Na <sup>+</sup>	<b>0.3749</b>	-0.3019	0.3084
K <sup>+</sup>	<b>0.4070</b>	-0.2825	-0.1324
Ca <sup>2+</sup>	0.2765	<b>0.4554</b>	-0.0208
Mg <sup>2+</sup>	0.3173	<b>0.3963</b>	0.2212
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.2287	<b>0.4651</b>	0.2796
Cl <sup>-</sup>	0.2129	-0.3167	<b>0.6717</b>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.3955</b>	-0.2591	-0.2089
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.3575	0.2504	-0.2249
SiO <sub>2</sub>	<b>0.3672</b>	-0.1348	-0.4630

Tabla 3.41. Correlaciones entre variables y componentes principales (PC). Segundo Muestreo.

	PC1	PC2
Na <sup>+</sup>	0.3245	<b>-0.4289</b>
K <sup>+</sup>	0.2418	<b>-0.5967</b>
Ca <sup>2+</sup>	<b>0.3655</b>	0.3175
Mg <sup>2+</sup>	<b>0.3819</b>	0.1130
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.3368	0.3068
Cl <sup>-</sup>	0.3503	-0.3362
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.3221	-0.0275
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.3594</b>	0.1077
SiO <sub>2</sub>	-0.3005	-0.3561



En los gráficos obtenidos en dos dimensiones de PC1 y PC2 (Figuras 3.38 y 3.39) podemos observar la variabilidad de las observaciones, y si existe alguna que ofrezca un valor extrañamente alto o bajo en cada eje.

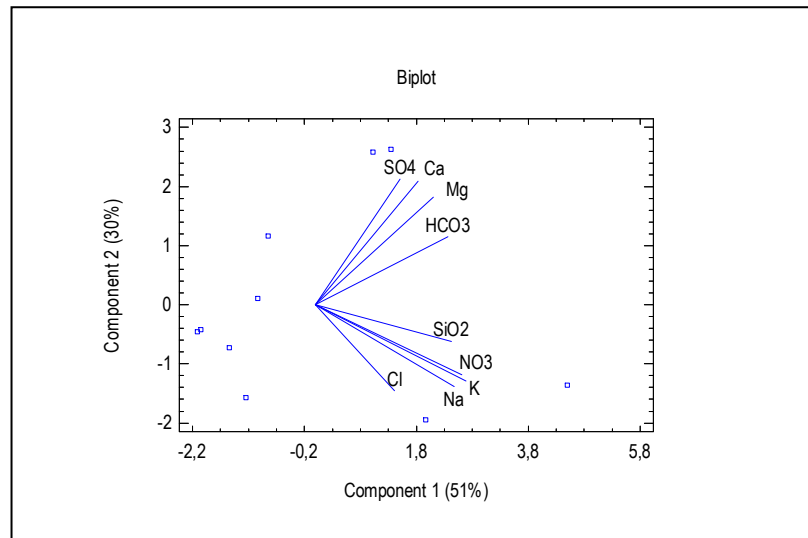


Figura 3.38. Representación gráfica del análisis de componentes principales. Primer Muestreo.

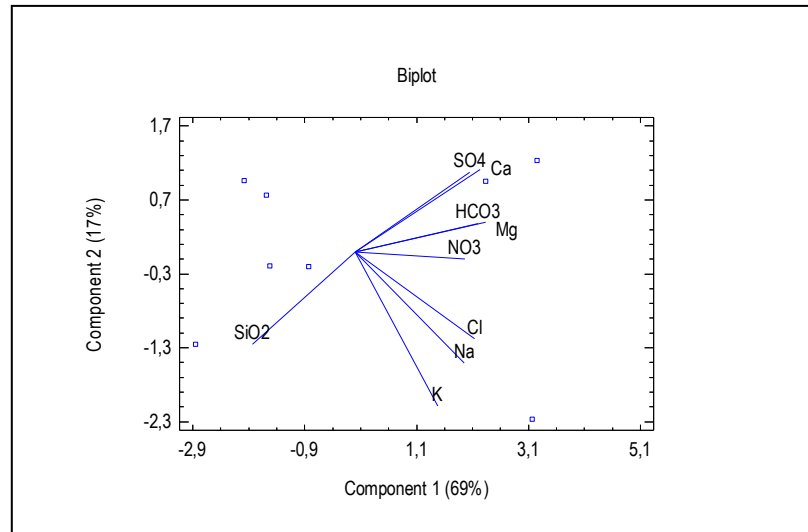


Figura 3.39. Representación gráfica del análisis de componentes principales. Segundo Muestreo.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

#### 3.3.7. Análisis de coeficientes de correlación

Para poder establecer relaciones entre los distintos analitos estudiados y conocer su distribución se ha llevado a cabo el análisis de correlación de los iones mayoritarios analizados y algunas de sus relaciones iónicas.

En el primer muestreo (Tabla 3.42) se obtiene que:

- El  $\text{HCO}_3^-$  se correlaciona significativamente con el calcio ( $r= 0.807$ ) y el magnesio ( $r= 0.634$ ), acorde con la naturaleza bicarbonatada de las aguas.
- El  $\text{SO}_4^{2-}$  muestra muy buena correlación con la conductividad eléctrica ( $r= 0.975$ ),  $\text{Ca}^{2+}$  ( $r= 0.907$ ) y  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r= 0.959$ ) y escasa o moderada con el resto de variables, acorde con la naturaleza sulfatada cálcica y magnésica de las aguas.
- El ión  $\text{Cl}^-$  presenta muy buena correlación significativa con el ión  $\text{Na}^+$  ( $r= 0.857$ ), moderada negativa con el pH y  $\text{Fe}^{3+}$ , moderada positiva con  $\text{NO}_3$  y  $\text{K}^+$ .
- El ión  $\text{NO}_3^-$  presenta elevada correlación significativa con  $\text{K}^+$  ( $r= 0.976$ ), relacionada con prácticas agrícolas, con  $\text{SiO}_2$  ( $r= 0.854$ ) y con  $\text{Na}^+$  ( $r= 0.818$ ), y escasa o moderada con el resto de variables.
- Existe buena correlación entre la  $\text{SiO}_2$  y K, relacionada con la alteración de silicatos.

En general, puede decirse que la correlación de la mayoría de variables con el pH,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Fe}^{3+}$  es escasa o moderada.

Las relaciones iónicas, por otro lado, presentan en general correlación inversa escasa o moderada con el resto de variables y entre ellas.

En el segundo muestreo (Tabla 3.43):

- El bicarbonato presenta muy buena correlación con el calcio ( $r= 0,894$ ) y buena con el magnesio ( $r= 0,797$ ).
- De la misma manera que en el primer muestreo, el ión  $\text{SO}_4^{2-}$  presenta muy buena correlación con la conductividad eléctrica,  $\text{Ca}^{2+}$  ( $r= 0.912$ ) y  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r= 0.942$ ), buena con el  $\text{NO}_3^-$ , escasa con el pH y el  $\text{Fe}^{3+}$ , y moderada con el resto de variables.
- El ión  $\text{Cl}^-$  muestra muy buena correlación con el ión  $\text{Na}^+$  ( $r= 0.983$ ), buena con la conductividad eléctrica,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , moderada positiva con el pH,  $\text{NO}_3$  y  $\text{SO}_4$ , negativa con la  $\text{SiO}_2$  y escasa e inversa con el  $\text{Fe}^{3+}$ .

- A diferencia del primer muestreo, el  $\text{NO}_3^-$ , se correlaciona bien con la conductividad eléctrica,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , moderadamente con el resto de variables y escasamente con el pH.

Tabla 3.42. Resumen grado de correlación primer muestreo.

Variable	Muy buena (>85%)	Buena (70-85%)	Moderada (30-70%)	Escasa (<30%)
pH	-	Na, rCa/Mg, rCa/SO <sub>4</sub>	Cl, NO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , K	Resto variables
CE	Ca, SO <sub>4</sub> , Mg	-	HCO <sub>3</sub> , Na, Fe, rCa/SO <sub>4</sub>	Resto variables
Cl	Na	-	pH, NO <sub>3</sub> , K, Fe, rNa/K	Resto variables
NO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> , K	Na	pH, HCO <sub>3</sub> , Fe, rNa/K	Resto variables
SO <sub>4</sub>	CE, Ca, Mg	-	HCO <sub>3</sub> , Fe, rCl/SO <sub>4</sub> , rCa/SO <sub>4</sub>	Resto variables
HCO <sub>3</sub>	-	Ca	Resto variables	pH, Cl, Fe, rNa/K, rCa/SO <sub>4</sub>
Na	Cl, K	pH, , NO <sub>3</sub>	CE, SiO <sub>2</sub> , HCO <sub>3</sub>	Resto variables
K	NO <sub>3</sub> , Na	SiO <sub>2</sub>	pH, Cl, HCO <sub>3</sub> , Fe, rNa/K, rCa/SO <sub>4</sub>	Resto variables
Ca	CE, SO <sub>4</sub> , Mg	HCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> , rCl/SO <sub>4</sub>	Resto variables
Mg	CE, SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub> , Ca	SiO <sub>2</sub> , rCl/SO <sub>4</sub>	Resto variables
Fe	-	-	Resto variables	pH, HCO <sub>3</sub> , Na, Ca, rNa/Cl
SiO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	K	Resto variables	rNa/Cl, rCa/Mg, rCa/SO <sub>4</sub>
rCl/SO <sub>4</sub>		-	Cl, SO <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub> , HCO <sub>3</sub> , Ca, Mg, Fe, rNa/Cl	Resto variables
rNa/Cl		-	pH, Cl, rCl/SO <sub>4</sub> , rNa/K	Resto variables
rNa/K		-	pH, Cl, NO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , HCO <sub>3</sub> , K, Fe, rNa/Cl	Resto variables
rCa/Mg	rCa/SO <sub>4</sub>	pH	HCO <sub>3</sub> , Fe	Resto variables
rCa/SO <sub>4</sub>	rCa/Mg	pH	CE, NO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , Na, Mg, Fe	Resto variables

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3.43. Resumen grado de correlación segundo muestreo.

Variable	Muy buena (>85%)	Buena (70-85%)	Moderado (30-70%)	Escaso (<30%)
pH	-	-	CE, Cl, HCO <sub>3</sub> , Na, K, Mg, Fe, rCl/SO <sub>4</sub> , rNa/K	Resto variables
CE	SO <sub>4</sub> , Ca, Mg, rNa/K	Cl, NO <sub>3</sub> , HCO <sub>3</sub> , rCl/SO <sub>4</sub> , rCa/SO <sub>4</sub>	Resto variables	Fe
Cl	Na, rNa/K	CE, HCO <sub>3</sub> , K, Mg,	Resto variables	Fe
NO <sub>3</sub>	-	CE, SO <sub>4</sub> , Ca, Mg, rCa/SO <sub>4</sub>	Resto variables	pH
SO <sub>4</sub>	CE, Ca, Mg	NO <sub>3</sub> , rCl/SO <sub>4</sub>	Resto variables	pH, Fe
HCO <sub>3</sub>	Ca	CE, Cl, SiO <sub>2</sub> , Mg, rNa/Cl, rNa/K	Resto variables	Fe, rCa/Mg, rCa/SO <sub>4</sub>
Na	Cl, rNa/K	K	Resto variables	Fe
K	-	Cl, Na	Resto variables	SiO <sub>2</sub> , rCl/SO <sub>4</sub> , rNa/Cl
Ca	CE, SO <sub>4</sub> , HCO <sub>3</sub> , Mg	NO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , , rNa/Cl, rNa/K	Resto variables	pH, Fe
Mg	CE, SO <sub>4</sub> , Ca, rNa/K,	Cl, NO <sub>3</sub> , , HCO <sub>3</sub> , rCl/SO <sub>4</sub> , Ca/SO <sub>4</sub>	Resto variables	-
Fe	-	-	Resto variables	CE, Cl, SO <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub> , HCO <sub>3</sub> , Ca, rNa/Cl
SiO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> , rNa/Cl	Ca, Mg, rNa/K	Resto variables	pH, K, Fe, rCa/Mg, rCa/SO <sub>4</sub>
rCl/SO <sub>4</sub>	-	CE, SO <sub>4</sub> , Mg, rCa/Mg, rCa/SO <sub>4</sub>	Resto variables	K, rNa/Cl
rNa/Cl	SiO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> , Ca	Resto variables	pH, K, Fe, rCl/SO <sub>4</sub> , rCa/Mg, rCa/SO <sub>4</sub>
rNa/K	CE, Cl, Na, Mg	HCO <sub>3</sub> , Ca, rCa/SO <sub>4</sub>	Resto variables	-
rCa/Mg	rCa/SO <sub>4</sub>	rCl/SO <sub>4</sub>	Resto variables	pH, SiO <sub>2</sub> , HCO <sub>3</sub> , r Na/Cl
rCa/SO <sub>4</sub>	rCa/Mg	CE, NO <sub>3</sub> , Mg, Cl, SO <sub>4</sub> , rNa/K	Resto variables	pH, SiO <sub>2</sub> , HCO <sub>3</sub> , rNa/Cl

## 3.3.8. Origen de la mineralización:

Los procesos implicados en la formación y composición del suelo en una zona determinada influyen considerablemente en la composición tanto de las aguas superficiales como subterráneas. Por tanto, la composición de un agua va a depender fundamentalmente del material por el que circule y con los que está en contacto.

Teniendo en cuenta los materiales sobre los que se sitúan las muestras analizadas puede indicarse que su composición procede de la alteración de los siguientes minerales y sustancias orgánicas (Tabla 3.44):

Tabla 3.44- Elementos y origen de los componentes de las aguas analizadas.

Elemento	Fuente
$\text{Na}^+$	Feldespato
$\text{K}^+$	Feldespato, mica
$\text{Mg}^{2+}$	Dolomita, silicatos ferromagnesianos
$\text{Ca}^{2+}$	Carbonato, sulfato, feldespato
$\text{Cl}^-$	Alteración de micas
$\text{HCO}_3^-$	Carbonatos, materia orgánica
$\text{SO}_4^{2-}$	Sulfatos, sulfuros
$\text{NO}_3^-$	Materia orgánica
$\text{SiO}_2$	Silicatos
$\text{Fe}^{2+}$	Silicatos, hidróxidos, sulfuros
$\text{PO}_4^{2-}$	Materia orgánica, fosfatos

La composición química original del agua puede modificarse por:

- Aportes: de elementos procedentes de aguas de lluvia, aguas escorrentía y aguas de lavado, así como aportes contaminantes;
- Pérdidas: por adsorción e intercambio iónico en suelos y materiales arcillosos o por mezclas de aguas.

Una manera de evaluar la relación calidad agua-alteración roca consiste en calcular el aporte de la precipitación a partir de la concentración de un parámetro conservativo (inerte) en la lluvia y el agua subterránea (Appelo&Postma, 1993). El anión cloruro es considerado un elemento conservativo y se utiliza para obtener un factor aproximado de evapotranspiración, a partir del agua de lluvia (Ericsson, 1960; Schoeller, 1960).

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El factor =  $\frac{[Cloruro]_{muestra}}{[Cloruro]_{lluvia}}$ , obtenido para cada muestra, se multiplica por el resto de

concentraciones de componentes del agua lluvia. El valor obtenido se resta a las concentraciones de cada componente de las muestras.

Se ha tomado la muestra de agua menos mineralizada como agua de referencia (IV-3, primer y segundo muestreo).

Las concentraciones que se obtienen (Tablas 3.45 y 3.46) son el resultado de la interacción del agua con la roca. Se han omitido los valores de concentración inferiores a 0,05 meq/l.

Tabla 3.45. Contribución de la alteración de la roca en la composición del agua (meq/l). Primer muestreo.

	IV-5	IV-9	IV-10	IV-12	IV-14	IV-18	IG-1	IG-2	IG-3
<b>Factor</b>	1,00	22,00	4,67	1,00	5,33	7,67	10,67	17,33	13,00
<b>Na<sup>+</sup></b>					0,05			0,22	0,08
<b>K<sup>+</sup></b>									
<b>Ca<sup>2+</sup></b>			0,87	1,20	2,95	2,78		1,73	0,41
<b>Mg<sup>2+</sup></b>				0,10	1,21	0,98		0,42	0,06
<b>Cl<sup>-</sup></b>									
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>					2,97	3,34		0,56	
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0,08		1,00	1,26	1,15	1,13	0,10	1,74	0,64
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>			0,10	0,20					

Tabla 3.46. Contribución de la alteración de la roca en la composición del agua (meq/l). Segundo muestreo.

	IV-5	IV-10	IV-12	IV-14	IV-18	IG-2	IVG-1
<b>Factor</b>	1,33	2,67	1,33	7,33	7,00	15,67	1,67
<b>Na<sup>+</sup></b>							
<b>K<sup>+</sup></b>							
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	1,09	1,32	1,68	2,46	3,31	0,61	0,91
<b>Mg<sup>2+</sup></b>			0,05	0,48	0,71		
<b>Cl<sup>-</sup></b>							
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>				1,80	2,46	0,16	
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0,85	0,77	1,37	0,09	0,49		0,67

Según los valores obtenidos al aplicar el factor  $Cl_{\text{muestra}}/Cl_{\text{lluvia}}$  se puede concluir que:

- Las concentraciones de  $Cl^-$ ,  $Na^+$  y  $K^+$  permanecen más o menos constantes en comparación con las de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $HCO_3^-$  y  $SO_4^{2-}$ .
- En las muestras IV-10 e IV-12 básicamente han aumentado las concentraciones de  $Ca^{2+}$  y  $HCO_3^-$  y  $CO_3^{2-}$ . Se deduce que su composición química ha sido consecuencia de la existencia de carbonatos en suelos y de la alteración de minerales silicatados procedentes de esquistos calcáreos y micaesquistos.
- Las muestras IV-14, IV-18 presentan, además del incremento en  $Ca^{2+}$  y  $HCO_3^-$ , también un ligero incremento en  $Mg^{2+}$  y  $SO_4^{2-}$ . El origen del magnesio podría deberse a la disolución de dolomías o calizas dolomíticas o bien al ataque de silicatos magnésicos y ferromagnésicos. Por otro lado, algunos esquistos pueden contener pirita ( $FeS_2$ ), que se oxidaría fácilmente a  $SO_4^{2-}$ . El aumento de las concentraciones de  $Ca^{2+}$  y  $HCO_3^-$  son consecuencia del proceso dominante de disolución de caliza.
- La contribución de la roca respecto a calcio, bicarbonato, sulfato y magnesio en las muestras IG-2 e IG-3 es similar, pero inferior, al de las muestras IV-14 y 18. El sodio procede principalmente de la alteración de feldespatos sódicos como la albita. Del mismo modo, el aumento de las concentraciones de  $Ca^{2+}$  y  $HCO_3^-$  indican la presencia de  $CaCO_3$  y, por tanto, que el proceso dominante ha sido la disolución de caliza.
- En la composición de las muestras IV-5 (Río Jarama), IV-9 (agua de escorrentía) e IG-1 (agua de escorrentía) la contribución de la roca es prácticamente inexistente y, por tanto, la composición química del agua es básicamente la composición de la lluvia. Posiblemente, esta menor contribución se deba a un menor tiempo de residencia del agua y a la lenta alteración de silicatos, de tal manera que no le ha dado tiempo a alcanzar el equilibrio y composición esperada.
- Siguiendo el razonamiento anterior para el segundo muestreo (Tabla 3.46), el proceso dominante en las muestras IV-14 e IV-18 es la disolución de la caliza, mientras que en las muestras IV-5, IV-10, IV-12 e IVG-1 es la alteración de minerales silicatados.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.3.8.1. Relación agua-suelo-roca:

Se han correlacionado las aguas del primer muestreo con suelos y rocas de la zona de estudio, de acuerdo a los contenidos en: As, Ba, Ca, Ce, Co, Fe, K, La, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, V y Zn (Anexo XVII).

Se han obtenido correlaciones positivas y muy significativas entre suelos y rocas (Anexo XVII), entre aguas y suelos IV-13, IV-16, IV-17 e IG-6; y entre aguas y la roca IV-13 (Tabla 3.47).

Las aguas más mineralizadas se correlacionan con suelos de mayor pH y conductividad, y cuyos materiales son más fácilmente alterables.

La escasa existencia de correlación entre agua y roca indica la falta de tiempo de contacto agua-roca necesario para que se produzca su alteración e incorporación de elementos resultantes.

Tabla 3.47. Correlaciones entre agua-suelo y roca.

AGUAS	0.8<r<1			0.7<r<0.8		
	AGUA	SUELO	ROCA	AGUA	SUELO	ROCA
IV-3	IV-5			IV-9, IG-1, IG-3		IV-13
IV-5	IV-3, IV-9, IG-1, IG-3			IV-10, IV-14, IV-18, IG-2		
IV-9	IV-5, IG-1, IG-3			IV-3, IG-2		
IV-10	IV-12, IV-14, IV-18, IG-1, IG-2, IG-3	IV-13, IV-16, IV-17	IV-13	IV-5		
IV-12	IV-10, IV-14, IV-18, IG-1, IG-2, IG-3	IV-13, IV-16, IV-17	IV-13			
IV-14	IV-10, IV-12, IV-18, IG-1, IG-2, IG-3	IV-13, IV-16, IV-17	IV-13	IV-5		
IV-18	IV-10, IV-12, IV-14, IG-1, IG-2, IG-3	IV-13, IV-16, IV-17	IV-13	IV-5		
IG-1	IV-5, IV-9, IV-10, IV-14, IV-18, IG-2, IG-3			IV-3, IV-12	IV-13, IV-16, IV-17	IV-13
IG-2	IV-10, IV-12, IV-14, IV-18, IG-1, IG-3	IV-13, IV-16, IV-17	IV-13	IV-5, IV-9	IG-6	
IG-3	IV-5, IV-9, IV-10, IV-12, IV-14, IV-18, IG-1, IG-2	IV-13, IV-17		IV-3	IG-6, IV-16	IV-13



Se han relacionado las aguas del primer muestreo a partir de los resultados obtenidos en los siguientes elementos y parámetros: Na, K, Ca, Mg, Fe, SO<sub>4</sub>, Cl, NO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, pH, conductividad y sólidos totales disueltos (Tabla 3.48).

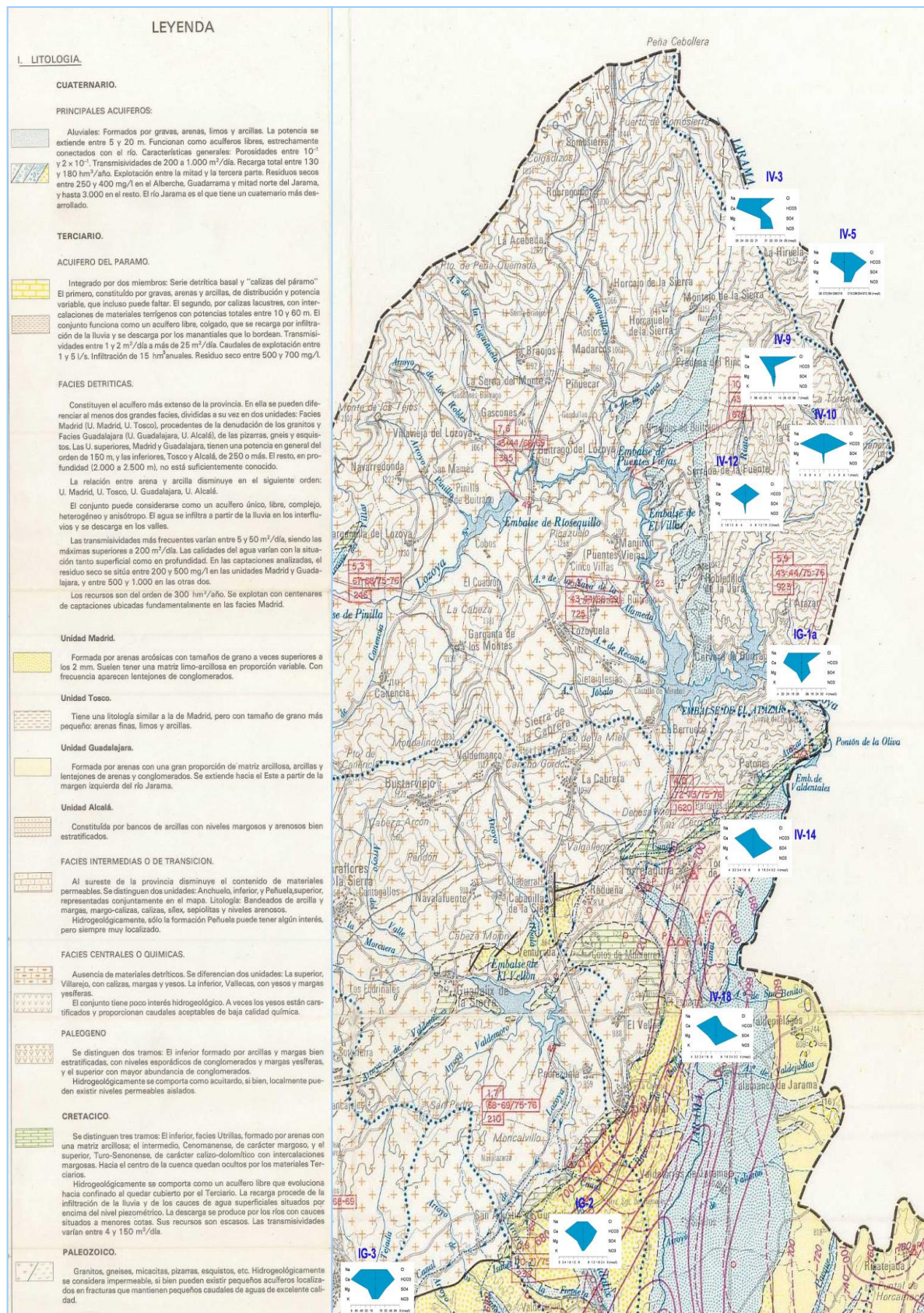
Tabla 3.48- Matrices de correlación entre muestras de agua del primer muestreo.

	IV-3	IV-5	IV-9	IV-10	IV-12	IV-14	IV-18	IG-1	IG-2	IG-3
IV-3	1									
IV-5	<b>0,951</b>	1,000								
IV-9	<b>0,940</b>	<b>0,895</b>	1,000							
IV-10	0,135	0,294	0,295	1,000						
IV-12	0,292	0,495	0,282	0,643	1,000					
IV-14	<b>0,916</b>	<b>0,892</b>	<b>0,919</b>	0,231	0,414	1,000				
IV-18	<b>0,920</b>	<b>0,893</b>	<b>0,924</b>	0,225	0,398	<b>1,000</b>	1,000			
IG-1	0,686	0,498	0,605	-0,044	0,145	0,615	0,614	1,000		
IG-2	<b>0,898</b>	<b>0,918</b>	<b>0,920</b>	0,368	0,567	<b>0,977</b>	<b>0,974</b>	0,585	1,000	
IG-3	<b>0,932</b>	<b>0,927</b>	<b>0,950</b>	0,335	0,506	<b>0,974</b>	<b>0,974</b>	0,643	<b>0,993</b>	1

Todas las aguas presentan mineralización muy baja, como corresponde a la naturaleza del terreno. Se han obtenido correlaciones positivas y muy significativas entre todas las aguas, a excepción de las muestras IV-10, IV-12 e IG-1. Las dos primeras, con una composición bicarbonatada cálcica, pH 8.4 y 9.0, respectivamente, y presencia de carbonatos, están tomadas en el Río Riato y Arroyo de La Puebla que desaguan en el embalse de El Atazar. La muestra IG-1 está tomada próxima al Poblado de la Presa de El Atazar y tiene una composición clorurada sódica-sulfatada sódica.

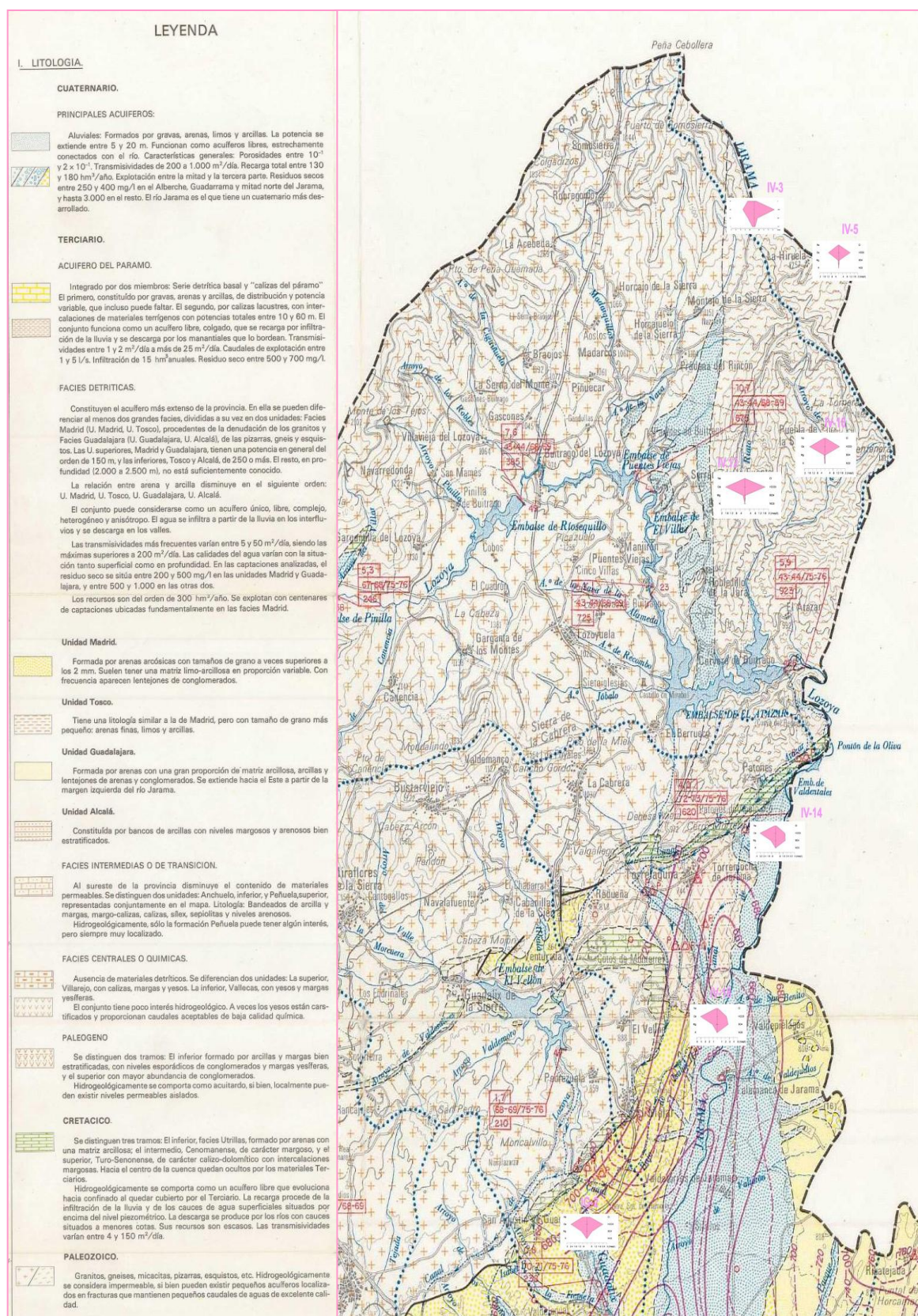
En la cartografía adjunta se sitúan los diagramas de Stiff, correspondientes a las muestras del primer y segundo muestreo.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Diagramas de Stiff correspondientes al primer muestreo. Zona de estudio en Mapa Hidrogeológico de la Comunidad de Madrid, escala 1:200.000.





Diagramas de Stiff correspondientes al segundo muestreo. Zona de estudio en Mapa Hidrogeológico de la Comunidad de Madrid, escala 1:200.000.



## BIBLIOGRAFÍA

---

- Adriano D.C., 1986. Trace Elements in Terrestrial Environment. Springer-Verlag. New York.
- Alloway, B.J., 1995. Soil processes and the behaviour of metals. In B.J. Alloway (ed) Heavy metals in soils. Blackie Academic. Professional, London.
- Amacher, M.C., Kotubi-Amacher, J., Selim, H.M., Iskandar, I.K., 1986. Retention and release of metals by soils. Evaluation of several models. Geoderma 38, 131-154.
- Anderson, K. E.: Water well handbook. Missouri Water Well Driller Association. Rolla, Missouri, 1963. 4ª ed. 1966.
- Anderson, P.R. , Christensen, T.H., 1988. Distribution coefficients of Cd, Co, Ni and Zn in soils. J. Soil Sci 39:15-25.
- Appelo, C.A.J., Postma, D., 1993. Geochemistry, groundwater and pollution. AA. Balkema/Rotterdam/Brookfield, 1993.
- BOE, 2005. Boletín Oficial del Estado 15, 18/01/2005. Ministerio de la Presidencia. Spain.
- B.O.E. nº 45/2003, de 21 de febrero de 2003: RD 140/2003, sobre los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
- B.O.E. nº 312/2003, de 30 de diciembre de 2003: Real Decreto 1744/2003, de 19 de diciembre, por el que se modifica el Real Decreto 1074/2002, de 18 de octubre (B.O.E. 259/2002, de 29 de octubre de 2002) por el que se regula el proceso de elaboración, circulación y comercio de aguas de bebida envasadas.
- Brindley, G.W y Brown, G. (1980). Crystal structures of clay minerals and their X-Ray identification. G.W Brindley y G. Brown (eds.) Mineralogical Society. London. 495 pp
- Cala, V., R. Sanchidrián, J., Guerra, A., 1985. Contaminación por metales pesados en suelos de la vega de Aranjuez. (I) pb, Cd, Cu, Zn, Ni y Cr Estudio de la contaminación por metales pesados en diversas especies vegetales de la vega de Aranjuez. (1) Distribución en las partes constitutivas. Anal. Edafología y Agrobiología. Vol XLIV, 11-12, pp: 1595-1608.
- Cala, V., R. Sanchidrián, J., Guerra, A., 1985. Contaminación por metales pesados de la vega de Aranjuez. (II) Tratamiento estadístico. Anal. Edafología y Agrobiología. Vol XLIV, 11-12, 1609-1622.
- Cano Parrilla, M.A., Moreno García, A.M. y González Parra, J., 1997. Evaluación de la contaminación por metales pesados en suelos de cultivo. Ecología 11: 83-89.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Custodio, E., Llamas, M.R., 1983. Hidrogeología subterránea. Segunda edición. Tomo I. págs. 201, 203, 208.
- Custodio, E., 1974. Contribuciones al conocimiento geohidroquímico de la Isla de Lanzarote (Islas Canarias, España). Simposio Internacional sobre Hidrología de Terrenos Volcánicos. Gobierno Español-UNESCO-PNUD. Arrecife de Lanzarote.
- Davies, B. E., 1980. Trace Element Pollution. In: Davies, B. E. (Ed), Applied Soil Trace Elements. Jon Wiley & Sons, New York, U.S.A., pp. 287-344.
- Directiva 98/83/EC, de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.
- Ericsson, E., 1960. The yearly circulation of chloride and sulfur in nature; meteorological, geochemical and pedological implications, Part II. Tellus 12, 63-109.
- Förstner U., 1955. Land contamination by metals: Global scope and magnitude of problem. In: Allen, H.E., Huang, Ch. P., Bailey, G.W., Bowers, A.R. (Eds), Metal Speciation and Contamination of Soil. CRC Press, Inc, pp 1-33.
- Giles, C.H., McEwan, T.H., Nakhawa, S.N., Smith, D., 1960. Studies of solution adsorption isotherms and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids. J. Chem. Soc. 3:3973-3993.
- Gomes, P.C., Fontes, M.P.F., da Silva, A.G., Mendonca, E.S., Netto, A.R., 2001. Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by Bra
- Haag, WR, Holgane J., 1983. Ozonation of bromide-containing waters: Kinetics of formation of hypobromous acid and bromate. Environmental Science and technology, 1983, 17:261-267.
- Hernández, L., Probst. A., Probst, J.L., Ulrich, E., 2003. Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. The Science of the Total Environment 312: 195-219.
- Horckmans, L., Swennen, R., Deckers, J., Maquil, R., 2005. Local background concentrations of trace elements in soils: a case study in the Grand Duchy of Luxembourg. Catena 59, 279-304.
- Hoyos, A. y González Parra, J., 1969. Estudio genético de algunos suelos de la Sierra de Guadarrama. III Comportamiento de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la génesis de los suelos. Anal. Edad. Agrobiol. 28, 631-641.

- 
- IGME, 2002. Determinación de niveles de fondo y niveles de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid. Serie: Medio Ambiente. Terrenos contaminados. Nº 2.
  - IHOBE, 1993. Calidad del suelo. Valores Indicativos de Evaluación. Ed. Gobierno Vasco. Departamento de Urbanismo, Vivienda y Medio Ambiente.
  - Kabata Pendias, A., Pendias, H., 1992. Trace Elements in Soils and Plants. 2<sup>nd</sup> ed. CRC Press. Boca Raton, F.L.
  - Krauskopf, K., 1967. Introduction to Geochemistry. McGraw-Hill, Inc. New York, 721pp.
  - López Vera, F y Saiz García-Cuenca, J., 1977. Capacidad de regulación de Terciario y Cuaternario sobre los caudales del río Jarama en los alrededores de Madrid. Boletín Geológico y Minero. T. LXXXVIII-II. Año 1977 (116-130).
  - López Vera, F., 1994. Variación del contenido en isótopos ambientales del acuífero Terciario Detrítico de Madrid: Estudio para determinar la recarga y el flujo del agua a las captaciones. Informe C.Y.II-UAM. 2 tomos. Madrid
  - Loughnan, F.C., 1969. Chemical weathering of the silicate. Minerals American Elsevier Publishing Company, Inc. New York, 54 pp.
  - Matshullat, J., Ottesen, R., Reimann, C., 2000. Geochemistry background-can we calculate it? Environ. Geol. 39, 990-1000.
  - Mc Bride, M. Sause, S., Hendershot, W. Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. Eur. S. Soil Sci. 1997. 48: 337-346.
  - Morera, M.T., Echevarría, J.C., Mazkarán, J., Garrido, J.J., (2001). Isotherms and sequential extraction procedures for evaluating sorption and distribution of heavy metals in soils. Environmental Pollution, 113: 135-144.
  - Pérez G, 2005. Tesis doctoral "Disponibilidad de metales tóxicos en sitios contaminados. Aplicaciones y limitaciones de la fraccionación en la determinación de gradientes de polución". Universidad Autónoma de Barcelona. Departamento de Química. Unidad de Química Analítica.
  - Reed, B.E., Cline, S.R., 1994. Retention and release of lead by a very fine sandy loam. I. Isotherm modelling separation. Sci Technol 29, 1529-1551.
  - Reedy, M.R. y Dunn, S.J., 1986. Distribution coefficients for nickel and zinc in soils. Environ. Pollut, 11: 303-313.



## BIBLIOGRAFÍA

---

- Reimann, C., de Caritat, P., 2005. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Sci. Total.*
- Reinmann, C. and Garrett, R.G., 2005. Geochemical background, concept and reality. *Science of the Total Environment* 350: 12-37.
- Reinmann, C., Filzmoser, p., Garrett, R.G., 2005. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of The Total Environment* 346: 1-16.
- Salomons, W., 1995. Long-term strategies for handling contaminated sites and large-scale areas. In "Biogeodynamics of pollutants in soils and sediments". Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 352 pp.
- Salminen, R., Tarvainen, T., 1997. The problem of defining geochemical baselines. A case study of selected elements and geological materials in Finland. *J. Geochem. Explor.* 60, 91-98.
- Salminen, R., Gregorauskiene, V., 2000. Considerations regarding the definition of a geochemical baseline of elements in the surficial materials in areas differing in Basic geology. *Appl. Geochem.* 15, 647-653.
- Schoeller, H., 1960, Salinity of groundwater, evapotranspiration and recharge of aquifers (in French). *IASH Pub.* 52, 488-494.
- Shotyk, W., Blazer, P., Grünig, A., Cheburkin, A.K., 2000. A new approach for quantifying cumulative, anthropogenic, atmospheric lead deposition using peat cores from bogs: Pb in eight Swiss peat bog profiles. *Sci Total Environ* 249: 281-295.
- Vázquez, I., 1999. Memoria de licenciatura: "Niveles de fondo y valores de referencia de elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid desarrollados sobre material granítico y calizo.
- Vázquez, I., Martín-Rubí, J.A., Moreno García, A.M., González Parra, J., 2000. Aplicación de fórmulas empríricas en el cálculo de valores de referencia de elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid. *Bol. Geol. Min.* 111, 63-77.
- Vegter, J.J., 1995. Soil Protection in the Netherlands. In: Salomons, S.W., Förstner, U., Mader, P. (Eds). *Heavy Metals*. Springer, pp. 79-101.
- Veeresh, H., Tripathy, S., Chaudhuri, D., Hart, B.R., Powell, M.A., 2003. Sorption and distribution of adsorbed metals in three soils of India. *Applied Geochemistry* 18: 1723-1731.
- [www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes\\_principales.pdf](http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf)



## 4. CONCLUSIONES

Considerando los objetivos planteados en esta memoria, las conclusiones obtenidas se exponen a continuación:

### **Características edáficas y grado de evolución de los suelos:**

- Los suelos estudiados de la zona presentan textura media franco-arenosa y valores medios de pH en agua próximos a la neutralidad, tanto en horizontes superficiales como subsuperficiales.
- Presentan un contenido de materia orgánica en superficie ligeramente inferior al 5%, disminuyendo al 2,5% en horizontes subsuperficiales.
- Son suelos no carbonatados, a excepción de 4 perfiles, con valores medios de conductividad inferiores a 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en superficie, disminuyendo a 70  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a una profundidad de 10 cm.

#### 4. CONCLUSIONES

---

- Los coeficientes de correlación entre parámetros edáficos indican que la materia orgánica se asocia positivamente con la fracción limo ( $r = 0.511$ ) y negativamente con la fracción arcilla ( $r = -0.423$ ) y el pH ( $r = -0.489$ ), consecuencia de que la materia orgánica no formaría complejos estables arcillo-húmicos. El pH se correlaciona positivamente con la arcilla ( $r = 0.516$ ). Los óxidos de Fe amorfo se encuentran asociados a la materia orgánica y están correlacionados negativa y significativamente con la arcilla, por lo que no estarían recubriendo a esta fracción. Los óxidos de Fe cristalinos están íntimamente relacionados con el Fe total ( $r = 0.843$ ), mientras que los óxidos de Mn amorfos lo están con el Mn total ( $r = 0.940$ ).
- Son suelos poco evolucionados en los que el porcentaje medio Fe libre/Fe total es del 20%, como corresponde a Regosoles, Leptosoles y Cambisoles, tipos de suelos representativos de la zona.

##### **Características químicas de los suelos:**

- La distribución de elementos químicos permite establecer los siguientes grupos en función de su contenido:
  - 1-70 g/kg: Al, Ca, Fe, K, Mg, Na y Ti.
  - 400-600 mg/kg: Ba, Mn y P.
  - 20-100 mg/kg: Ce, Cr, La, Ni, Pb, V y Zn.
  - 7-14 mg/kg: Co, Sc e Y.
  - 0,007-0,015 mg/kg: As, Cd y Cu.

Valores que coinciden con los elementos mayoritarios y traza de la litosfera.

- Los elementos que presentan correlación significativa y negativa con la arcilla son cromo y níquel, siendo el cromo el único elemento que se correlaciona con la arena. Casi todos los elementos se correlacionan significativa y negativamente con el pH. Los elementos que se asocian positiva y significativamente con la materia orgánica son Co, Cu, Ni, P, V y Zn, los cuales estarían constituyendo complejos organometálicos.

Con el limo se asocian positiva y significativamente Ce, Co, Fe, La, Ni, Sc, V y Zn, que estarían formando parte de las estructuras minerales. Existen asociaciones preferenciales entre Ca-Mg; La-Ce-Ti; Co-Ni-Fe-Sc-V.

- Los componentes químicos del suelo están correlacionados significativamente con las rocas originales del suelo.
- Los valores de índices de acumulación edáfica obtenidos ponen de manifiesto que, en la mayoría de los perfiles, no existe acumulación de elementos respecto al contenido de la roca original. Los valores indicarían su origen geogénico, más o menos modificado por los procesos edafogénicos, lo cual se corrobora por las correlaciones significativas entre suelos y roca.
- Considerando el aluminio como elemento de referencia, se han obtenido valores de factor de enriquecimiento, en general, próximos a la unidad, lo que indica falta de aportes externos y escasa alteración química.
- Se han propuesto valores de referencia deducidos en base a niveles de fondo (NF), a partir de las ecuaciones de regresión múltiple obtenidas de aquellos elementos (Al, Ba, Ce, Co, Cr, La, Mn, Ni, Pb, Sc, Ti, V y Zn) que han dado significación entre las variables edáficas consideradas (materia orgánica, hierro y arcilla). Para aquellos elementos, como As, Cu e Y, en los que no existe correlación significativa, se ha utilizado la fórmula convencional a partir del Valor de Fondo (VF)+2 veces la desviación estándar.

#### **Comportamiento de los suelos frente a la contaminación:**

De la contaminación de suelos con Ni a concentraciones de 500-1000-2500-5000 y 10000 mg/kg se puede concluir que:

- Las isothermas de sorción son, en general, de tipo L, existiendo dos muestras con isothermas de tipo H.
- Los porcentajes medios de sorción se incrementan al disminuir la concentración de Ni añadida.

#### 4. CONCLUSIONES

---

- Los valores medios de  $K_d$  muestran un incremento a menores concentraciones añadidas, luego la afinidad de los componentes del suelo por el Ni es mayor a bajas concentraciones.
- Los porcentajes medios de extracción de Ni disminuyen al disminuir la concentración de Ni añadido. A bajas concentraciones el metal queda fundamentalmente en posiciones específicas. A concentraciones más elevadas, el Ni ocupa mayoritariamente posiciones de cambio, con lo que el riesgo de transferencia a otros medios es tanto mayor cuanto mayor es la concentración de Ni añadido.
- El pH contribuye positivamente a la sorción del Ni precipitando el elemento o disociando grupos funcionales, incrementando las cargas variables negativas de la arcilla, materia orgánica y óxidos.
- Los óxidos no son contribuyentes fundamentales en la sorción, pero pueden fijar Ni a su estructura por sustitución isomórfica.
- En los suelos naturales no contaminados, el Ni se asocia a óxidos de hierro cristalinos, siendo muy difícil su liberación. El porcentaje de extracción obtenido es muy bajo (0,02%) por lo que apenas existe riesgo de transferencia a otros compartimentos (agua, vegetación, cadena trófica).

#### **Calidad de las aguas y relación con la litología de la cuenca:**

- Teniendo en cuenta los parámetros físico-químicos y radiactivos analizados en las muestras de agua, se puede concluir que, en general, ninguno de los parámetros obtenidos supera los valores establecidos en la Reglamentación Técnico Sanitaria (BOE 312/2003).
- Las aguas analizadas presentan predominio de contenidos en calcio, magnesio, sulfato y bicarbonato sobre cloruro y sodio, siendo la composición química para la mayoría de ellas, bicarbonatada cálcica-sódica, sulfatada-magnésica.

- Las correlaciones existentes entre bicarbonato-calcio y magnesio, entre sulfato-calcio y magnesio, y entre cloruro y sodio son muy significativas.
- Son aguas muy poco mineralizadas (sumatorio de cationes inferior a 5,7 meq/l y de aniones inferior a 5,32 meq/l), indicando su inmadurez.
- La baja mineralización de las aguas, junto con su pH neutro o ligeramente básico, son consecuencia del origen o tránsito granítico.
- Las muestras de mayor mineralización, IV-14 e IV-18, tomadas en la terraza baja del Jarama, e IG-2, tomada en San Agustín de Guadalix, se localizan en materiales cuaternarios (aluviales formados por gravas, arena, limos y arcillas) y presentan mayor valor de conductividad. Muestras con menor mineralización y conductividad se sitúan en materiales paleozóicos (granito, gneises, pizarras, esquistos).
- En general, existe un incremento regular de sólidos totales disueltos y de la mineralización de las aguas en dirección norte-sur del río Jarama.
- La correlación existente entre nitratos, sodio y potasio se relaciona con prácticas agrícolas y ganaderas. La correlación existente entre sílice y potasio, se relaciona con la alteración de silicatos.
- Los procesos predominantes que han contribuido a la composición de las aguas han sido disolución de materiales carbonatados en unas muestras y alteración de minerales silicatados en otras; considerando el anión cloruro como elemento de referencia y tomando el agua menos mineralizada como agua de referencia.
- Se han obtenido correlaciones significativas y positivas entre suelos y rocas, y escasas correlaciones entre aguas y rocas. Este último hecho, tal vez, se debe a la falta de tiempo de contacto necesario para que se produzca la alteración e incorporación de elementos litogénicos a la misma.

#### 4. CONCLUSIONES

---

- Se han obtenido correlaciones muy significativas entre las aguas más mineralizadas y los suelos con mayor pH, conductividad y contenido en calcio y magnesio.
- En las aguas estudiadas, principalmente tomadas en cauces fluviales, el tiempo de contacto con los materiales litológicos y suelos es corto, lo cual condiciona una cinética de alteración lenta. Si a esto se une que los materiales son de difícil alteración, las aguas son, en general, muy inmaduras y con una mineralización baja. Cuando los materiales por los que transcurren las aguas son de fácil alteración, a pesar del corto tiempo de residencia, la cinética es más rápida y la mineralización de las aguas es mayor.

**ANEXOS**

**ANEXO 1**  
**ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS**



- Tabla 1.1. Concentraciones medias de As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn observadas en matrices medioambientales de origen geológico ( $\mu\text{g/kg}$ ).*
- Tabla 1.2. Fuentes de contaminación antropogénica de suelos y sedimentos.*
- Tabla 1.3. Estándares de calidad de suelos ( $\text{mg/kg}$ ).*
- Tabla 1.4. Rangos de concentración normal en muestras de agua no contaminadas y fuentes de elementos.*
- Tabla 1.5. Concentraciones máximas permitidas legislativamente de metales en suelos tratados con fangos de estaciones depuradoras, en diferentes países de la comunidad económica europea ( $\text{mg/kg}$ ).*
- Tabla 1.6. Niveles genéricos de referencia de metales pesados y elementos traza.*
- Tabla 2.1. Datos y características generales de las muestras analizadas.*
- Tabla 2.2. Sustratos geológicos correspondientes a las muestras de suelo analizadas.*
- Tabla 2.3. Características de los espectrómetros utilizados.*
- Tabla 2.4. Grupos A, B, C, D y M de elementos traza.*
- Tabla 2.5. Grupos E y G de elementos traza.*
- Tabla 2.6. Líneas de trabajo y CMD en muestras sólidas.*
- Tabla 2.7. Rango de trabajo de aniones analizados.*
- Tabla 2.8. Rango de trabajo de cationes analizados.*
- Tabla 2.9. Rangos de trabajo en llama.*
- Tabla 2.10. Rangos de trabajo en cámara de grafito.*
- Tabla 3.1. Clasificación de suelos en función de su acidez.*
- Tabla 3.2. Clasificación del tipo de suelo en función del contenido de sales disueltas, expresado como conductividad.*
- Tabla 3.3. Contenido de carbonatos (%).*
- Tabla 3.4. Relación Fe libre/Fe total. Contenidos en óxidos de Fe y Mn ( $\text{g/kg}$ ) en horizonte superficial.*
- Tabla 3.5. Significado de los valores de índice de enriquecimiento (FE) considerando el Al como elemento de referencia.*
- Tabla 3.6. Estadísticos del análisis granulométrico (%). Primer muestreo.*
- Tabla 3.7. Estadísticos del análisis granulométrico (%). Segundo muestreo.*

*Tabla 3.8. Estadísticos de conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ ), pH y componentes orgánicos (%<sup>1</sup>). Primer muestreo.*

*Tabla 3.9. Estadísticos de conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ ), pH y componentes orgánicos (%<sup>1</sup>). Segundo muestreo.*

*Tabla 3.10. Tabla de componentes principales.*

*Tabla 3.11. Tabla de peso de las componentes.*

*Tabla 3.12. Correlación entre elementos.*

*Tabla 3.13. Rectas de regresión, p-values,  $r^2$ , nivel de confianza, variable a eliminar.*

*Tabla 3.14. Valores de referencia establecidos en Comunidades Autónomas españolas, en otros países y VR propuestos.*

*Tabla 3.15. Coeficientes de distribución entre muestras IV.*

*Tabla. 3.16. Coeficientes de distribución entre muestras IG.*

*Tabla 3.17. Correlaciones entre Ni sorbido-extraído y parámetros edáficos.*

*Tabla 3.18. Contenidos de Ni ( $\mu\text{g/kg}$ ) extraídos en muestras sin contaminar.*

*Tabla 3.19. Porcentajes de Ni extraído en suelos sin contaminar, contaminados con 1000 mg/kg de Ni y en suelos formados sobre rocas ultrabásicas (serpentinas).*

*Tabla 3.20. Tipología de las aguas, mineralización, conductividad y dureza. Primer muestreo.*

*Tabla 3.21. Tipología de las aguas, mineralización, conductividad y dureza. Segundo muestreo.*

*Tabla 3.22. Muestras de agua, ubicación y sustrato geológico.*

*Tabla 3.23. Contenido de aniones y cationes (mg/l) y balance iónico. Primer muestreo.*

*Tabla 3.24. Parámetros estadísticos de compuestos mayoritarios. Primer muestreo.*

*Tabla 3.25. Contenido de aniones y cationes (mg/l) y balance iónico. Segundo muestreo.*

*Tabla 3.26. Parámetros estadísticos de compuestos mayoritarios. Segundo muestreo.*

*Tabla 3.27. Valores obtenidos de oxidabilidad (mg/l de  $\text{O}_2$ ), sólidos totales disueltos (mg/l) y cianuros ( $\mu\text{g/l}$ ).*

*Tabla 3.28. Parámetros químicos (RD 1744/2003).*

*Tabla 3.29. Contenidos en compuestos orgánicos ( $\mu\text{g/l}$ ). (RD 1744/2003).*

*Tabla 3.30. Valores paramétricos de compuestos orgánicos analizados.*

*Tabla 3.31. Contenidos de elementos determinados por absorción atómica (AA) y plasma acoplado inductivamente (ICP). Primer muestreo.*

*Tabla 3.32. Contenidos de elementos determinados por absorción atómica (AA). Segundo muestreo.*

*Tabla 3.33. Parámetros químicos (Parte B, anexo IV, BOE núm. 312).*

*Tabla 3.34. Resultados de actividad alfa y beta total (Bq/l).*

*Tabla 3.35. Unidades de tritio en muestras primer muestreo.*

*Tabla 3.36. Relaciones iónicas y estadísticos del primer muestreo.*

*Tabla 3.37. Relaciones iónicas y estadísticos del segundo muestreo.*

*Tabla 3.38. Análisis de componentes principales Primer Muestreo.*

*Tabla 3.39. Análisis de componentes principales Segundo Muestreo.*

*Tabla 3.40. Correlaciones entre variables y componentes principales (PC's) del primer muestreo.*

*Tabla 3.41. Correlaciones entre variables y componentes principales (PC's) del segundo muestreo.*

*Tabla 3.42. Resumen grado de correlación. Primer muestreo.*

*Tabla 3.43. Resumen grado de correlación. Segundo muestreo.*

*Tabla 3.44. Elementos y origen de los componentes de las aguas analizadas.*

*Tabla 3.45. Contribución de la alteración de la roca en la composición del agua (meq/l). Primer muestreo.*

*Tabla 3.46. Contribución de la alteración de la roca en la composición del agua (meq/l). Segundo muestreo.*

*Tabla 3.47. Correlaciones entre agua-suelo-roca.*

*Tabla 3.48. Matrices de correlación entre muestras de agua del primer muestreo.*



- Figura 3.1. Fracciones granulométricas del primer muestreo (%).*
- Figura 3.2. Fracciones granulométricas del segundo muestreo (%).*
- Figura 3.3. Valores promedio de pH en agua y KCl.*
- Figura 3.4. Valores promedio de componentes orgánicos (%).*
- Figura 3.5. Contenido medio de elementos entre 0,1-7%.*
- Figura 3.6. Contenido medio de elementos entre 400-600 mg/kg.*
- Figura 3.7. Contenido medio de elementos entre 20-100 mg/kg.*
- Figura 3.8. Contenido medio de elementos entre 7-14 mg/kg.*
- Figura 3.9. Contenido medio de elementos entre 0,007-0,015 mg/kg.*
- Figura 3.10. Elementos traza en suelos comparados con su abundancia en la litosfera.*
- Figura 3.11. Valores promedio de factores de enriquecimiento ( $M_{\text{suelo}}/A_{\text{roca}}$ )( $M_{\text{roca}}/A_{\text{suelo}}$ ).*
- Figura 3.12. Cluster de variables (n=27) del horizonte superficial del primer y segundo muestreo.*
- Figura 3.13. Cluster de casos (n=23) del primer y segundo muestreo*
- Figura 3.14. Diagrama de los pesos de las componentes 1 y 2.*
- Figura 3.15. Isotermas de sorción de muestras IV.*
- Figura 3.16. Isotermas de sorción de muestrsa IG.*
- Figura 3.17. Porcentajes medios de sorción. Muestras IV.*
- Figura 3.18. Porcentajes medios de sorción. Muestras IG.*
- Figura 3.19. Isotermas de extracción de muestras IV.*
- Figura 3.20. Isotermas de extracción de muestrsa IG.*
- Figura 3.21. Porcentajes de extracción. Muestras IV.*
- Figura 3.22. Porcentajes de extracción. Muestras IG.*
- Figura 3.23. Distribución de litofacies en la cuenca de Madrid.*
- Figura 3.24. Esquema general del acuífero indicando las zonas de recarga.*
- Figura 3.25. Diagrama logarítmico vertical del primer muestreo.*
- Figura 3.26. Diagrama logarítmico vertical del segundo muestreo.*
- Figura 3.27. Representación en columnas logarítmicas verticales de las muestras de agua de los puntos IV-3, IV-5, IV-9, IV-10.*
- Figura 3.28. Representación en columnas logarítmicas verticales de las muestras de agua de los puntos IV-12, IV-14, IV-18 e IG-1.*

*Figura 3.29. Representación en columnas logarítmicas verticales de las muestras de agua de los puntos IG-2, IG-3 e IVG-1.*

*Figura 3.30. Diagrama box-plot de las distintas concentraciones iónicas (mmol/l) de las variables sin transformación logarítmica. Primer muestreo.*

*Figura 3.31. Diagrama box-plot de las distintas concentraciones iónicas (mmol/l) de las variables con transformación logarítmica.*

*Figura 3.32. Diagrama box-plot de las distintas concentraciones iónicas (mmol/l) de las variables sin transformación logarítmica. Segundo muestreo.*

*Figura 3.33. Diagrama box-plot de las distintas concentraciones iónicas (mmol/l) de las variables con transformación logarítmica. Segundo muestreo*

*Figura 3.34. Representación del dendograma de resultante del HCA de las principales variables analizadas empleando el método de agrupación de Ward y la distancia Euclidiana al cuadrado como medida de similitud. Primer muestreo.*

*Figura 3.35. Representación de los dendogramas resultantes del HCA de las principales variables empleando el método de agrupación de Ward y la distancia Euclidiana al cuadrado como medida de similitud. Segundo muestreo*

*Figura 3.36. Representación de los dendogramas resultantes del HCA de casos empleando el método de agrupación de Ward y la distancia Euclidiana al cuadrado como medida de similitud. Segundo muestreo.*

*Figura 3.37. Representación de los dendogramas resultantes del HCA de casos empleando el método de agrupación de Ward y la distancia Euclidiana al cuadrado como medida de similitud. Segundo muestreo.*

*Figura 3.38. Representación gráfica del análisis de componentes principales del primer muestreo.*

*Figura 3.39. Representación gráfica del análisis de componentes principales del segundo muestreo.*

**ANEXO I: RESULTADOS ANALÍTICOS OBTENIDOS DE  
PARÁMETROS EDÁFICOS. PRIMER MUESTREO.**

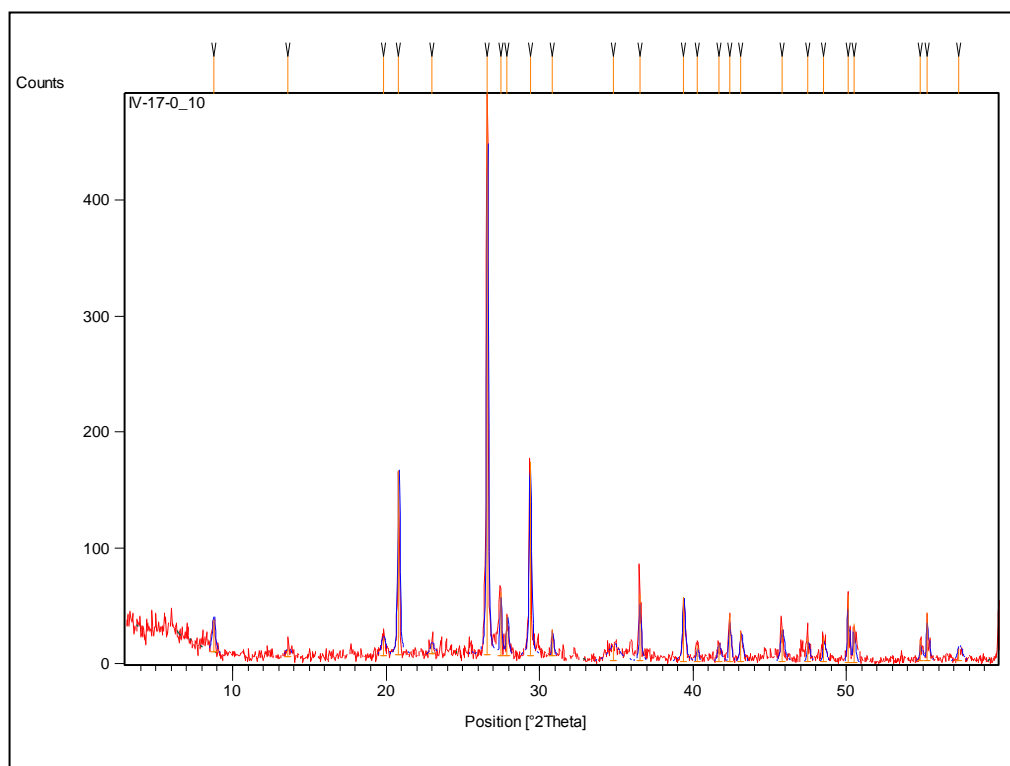
ANEXO I: RESULTADOS ANALÍTICOS OBTENIDOS DE PARÁMETROS EDÁFICOS. PRIMER MUESTREO.

PERFIL	Prof.(cm)	Arcilla (<2µm)	Limo (50-2 µm)	A. gruesa (2000-200 µm)	A. fina (200-50 µm)	AG+AF (2000-50µm)	Textura
IV-1	0-15	3	38	21	38	59	Franco-arenosa
	15-30	1	7	76	15	91	Arenosa
IV-2	0-10	12	45	22	21	43	Franca
	10-20	13	42	25	20	45	Franca
	>70	11	42	27	20	47	Franca
IV-4	0-10	2	22	33	43	76	Arenosa-franca
	10-20	3	30	26	41	67	Franco-arenosa
IV-6	0-10	3	23	27	46	73	Arenoso-franca
	10-20	5	21	34	40	74	Arenoso-franca
IV-7	0-10	8	22	41	29	70	Franco-arenosa
	10-20	4	24	39	32	71	Arenoso-franca
IV-8	0-10	15	51	15	19	34	Franco-limosa
	10-20	13	52	14	21	35	Franco-limosa
IV-11	0-10	6	62	22	10	32	Franco-limosa
	10-20	8	60	23	9	32	Franco-limosa
IV-13	0-10	14	50	19	17	36	Franco-franco limosa
	10-20	20	48	15	18	33	Franca
IV-15	0-10	6	26	22	46	68	Franco-arenosa
	10-20	4	19	39	38	77	Arenoso-franca
	20-45	5	30	19	46	65	Franco-arenosa
IV-16	0-10	14	23	28	35	63	Franco-arenosa
	10-20	10	28	30	32	62	Franco-arenosa
IV-17	0-10	17	26	36	21	57	Franco-arenosa
	10-20	17	27	36	20	56	Franco-arenosa
IV-19	0-10	16	27	35	22	57	Franco-arenosa
	10-20	10	28	40	22	62	Franco-arenosa
IV-20	0-10	25	32	25	18	43	Franca
	10-20	27	31	26	16	42	Franca
IV-21	0-10	11	31	38	20	58	Franco-arenosa
	10-20	11	31	39	19	58	Franco-arenosa
IV-22	0-10	12	26	43	19	62	Franco-arenosa
	10-20	8	26	46	20	66	Franco-arenosa
IV-23	0-10	6	35	42	17	59	Franco-arenosa
	10-20	9	37	40	14	54	Franco-arenosa



ANEXO I: RESULTADOS ANALÍTICOS OBTENIDOS DE PARÁMETROS EDÁFICOS. PRIMER MUESTREO.

PERFIL	Prof. (cm)	pH agua	pH CIK	Conductividad (μS/cm)	(%) Materia orgánica	(%) Carbono orgánico
IV-1	0-15	5.25	3.75	47.2	9.92	5.77
	15-30	6.42	4.07	18.7	1.07	0.62
IV-2	0-10	6.02	4.85	79.6	5.86	3.41
	10-20	4.56	3.20	43.5	1.94	1.13
	>70	n.d.	n.d.	n.d.	1.0	0.58
IV-4	0-10	4.97	3.68	63.2	5.73	3.33
	10-20	4.95	3.76	26.8	2.82	1.64
IV-6	0-10	5.66	4.25	42.4	2.51	1.46
	10-20	5.76	3.93	27.6	1.12	0.65
IV-7	0-10	6.15	5.38	66.8	3.53	2.05
	10-20	6.59	5.46	54.0	2.82	1.64
IV-8	0-10	5.47	4.00	53.7	4.01	2.33
	10-20	5.30	3.94	53.1	3.75	2.18
IV-11	0-10	5.05	4.05	77.7	11.24	6.53
	10-20	4.85	3.78	40.6	6.79	3.95
IV-13	0-10	7.55	7.20	140.8	6.43	3.74
	10-20	8.12	7.43	111.0	3.27	1.90
IV-15	0-10	7.60	7.05	63.9	1.70	0.99
	10-20	7.56	6.66	47.9	0.82	0.48
	20-45	7.66	6.87	57.5	1.15	0.67
IV-16	0-10	7.71	6.97	155.2	6.82	3.97
	10-20	7.64	6.95	111.6	2.31	1.34
IV-17	0-10	8.04	7.26	77.0	3.04	1.77
	10-20	7.93	7.06	90.9	2.30	1.34
IV-19	0-10	n.d.	n.d.	n.d.	2.43	1.41
	10-20	7.36	6.35	94.0	3.85	2.24
IV-20	0-10	6.86	5.90	n.d.	3.34	1.94
	10-20	6.19	4.42	53.8	1.60	0.93
IV-21	0-10	7.21	6.54	80.4	1.83	1.06
	10-20	7.63	6.60	64.4	1.78	1.03
IV-22	0-10	7.04	6.09	85.0	4.64	2.70
	10-20	7.28	6.02	61.6	1.81	1.05
IV-23	0-10	6.91	6.20	141.27	7.19	4.18
	10-20	n.d.	n.d.	n.d.	3.78	2.20



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
8,7847	28,32	0,2362	10,06633	5,77
13,6216	6,66	0,4723	6,50079	1,36
19,8229	15,69	0,3149	4,47892	3,19
20,8261	158,78	0,1574	4,26538	32,32
22,9778	8,75	0,2362	3,87058	1,78
26,5936	491,22	0,1181	3,35197	100,00
27,4695	55,53	0,1181	3,24704	11,30
27,9037	34,59	0,1574	3,19749	7,04
29,3884	167,85	0,1574	3,03925	34,17
30,8483	22,54	0,1181	2,89867	4,59
34,8166	12,37	0,7872	2,57684	2,52
36,5386	57,45	0,1181	2,45925	11,70
39,3941	56,28	0,1968	2,28733	11,46
40,2708	14,02	0,1181	2,23954	2,85
41,6904	14,83	0,2362	2,16650	3,02
42,3874	41,80	0,1181	2,13247	8,51
43,1366	26,03	0,1968	2,09716	5,30
45,8042	28,89	0,2362	1,98104	5,88
47,5065	20,35	0,1574	1,91395	4,14
48,5375	20,88	0,1574	1,87568	4,25
50,0886	58,96	0,1181	1,82117	12,00
50,4794	34,29	0,1181	1,80799	6,98
54,8212	17,48	0,1181	1,67463	3,56
55,2638	41,15	0,1181	1,66226	8,38
57,3401	10,20	0,2880	1,60557	2,08

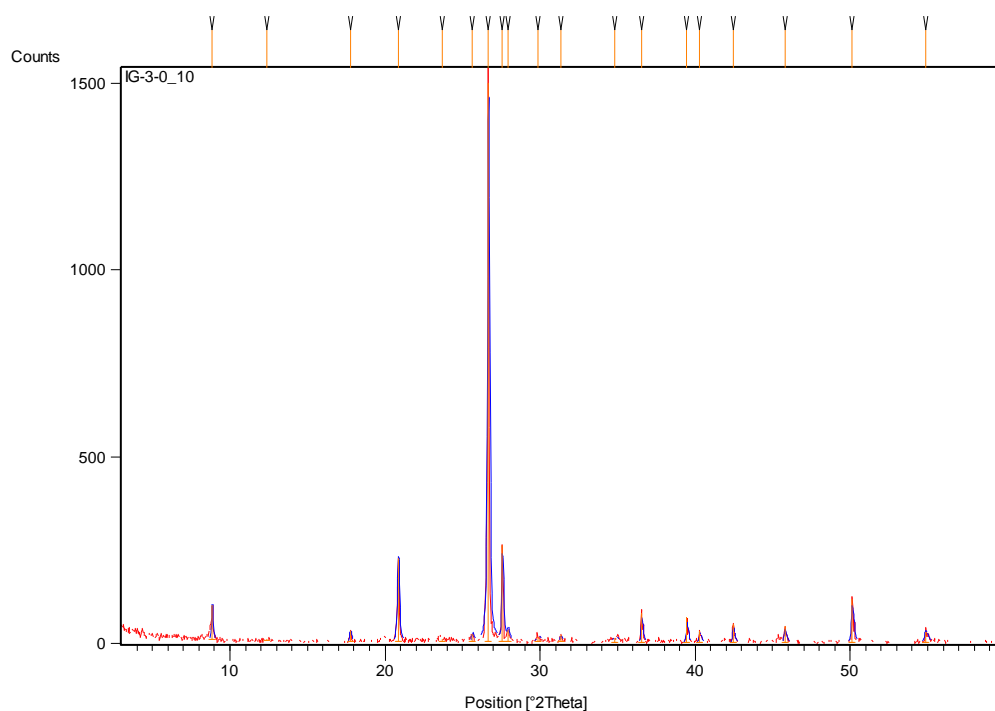
**ANEXO II: RESULTADOS ANALÍTICOS OBTENIDOS DE  
PARÁMETROS EDÁFICOS. SEGUNDO MUESTREO.**

ANEXO II: RESULTADOS ANALÍTICOS OBTENIDOS DE PARÁMETROS EDÁFICOS. SEGUNDO MUESTREO.

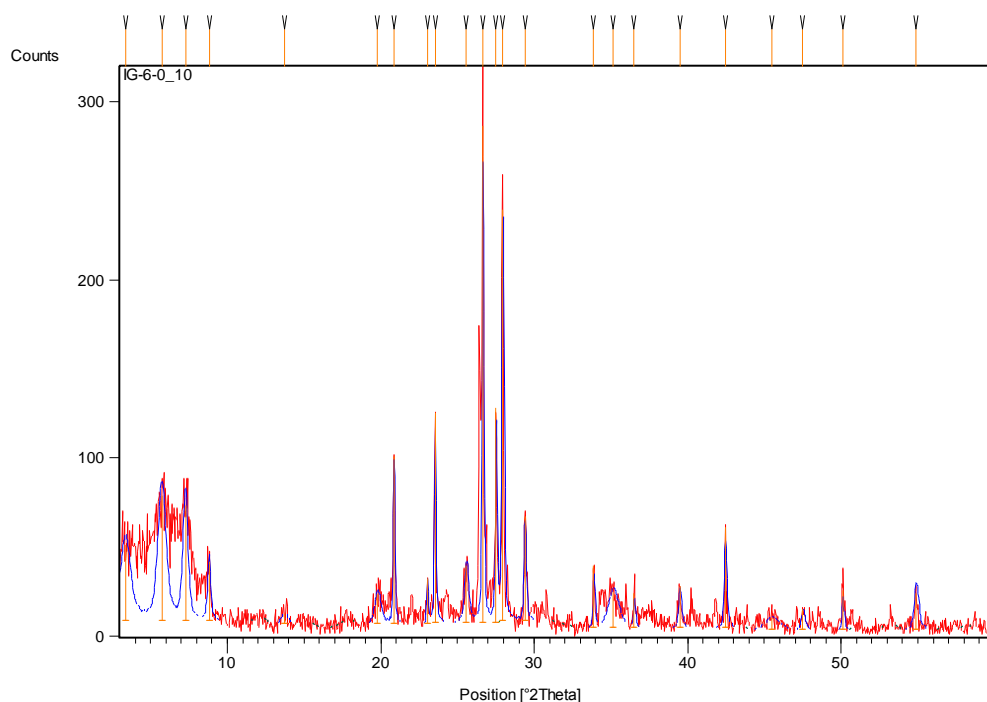
PERFIL	Prof.(cm)	Arcilla ( $<2\mu\text{m}$ )	Limo ( $50-2\mu\text{m}$ )	A. gruesa ( $2000-200\mu\text{m}$ )	A. fina ( $200-50\mu\text{m}$ )	AG+AF ( $2000-50\mu\text{m}$ )	Textura
IG-1	0-10	10	50	23	17	40	Franco-limosa
	10-20	42	44	4	10	14	Franco-franco limosa
IG-2	0-10	10	45	37	8	45	Franca
	10-20	12	50	32	7	39	Franca
IG-3	0-10	13	44	19	25	44	Franca
	10-20	11	40	20	28	48	Franca
IG-4	0-10	7	19	60	14	74	Franco-arenosa
	10-20	7	15	65	13	78	Franco-arenosa
IG-5	0-10	7	30	49	14	63	Franco-arenosa
	10-20	6	20	59	16	75	Franco-arenosa
IG-6	0-10	29	24	34	13	47	Franca
	10-20	29	21	38	13	51	Franca
IG-7	0-10	11	15	59	15	74	Franco-arenosa
	10-20	9	14	65	13	78	Franco-arenosa

ANEXO II: RESULTADOS ANALÍTICOS OBTENIDOS DE PARÁMETROS EDÁFICOS. SEGUNDO MUESTREO.

PERFIL	Prof.(cm)	pH agua	pH KCl	Conductividad (μS/cm)	(%) Materia orgánica	(%) Carbono orgánico
IG-1	0-10	6.41	5.10	91.73	3.86	2.24
	10-20	5.64	3.84	113.23	1.24	0.72
IG-2	0-10	6.00	4.40	65.43	6.25	3.64
	10-20	5.50	3.96	46.33	7.12	4.15
IG-3	0-10	6.31	5.36	63.90	2.45	1.42
	10-20	5.76	4.85	58.63	3.34	1.94
IG-4	0-10	7.56	6.13	84.43	3.61	2.10
	10-20	7.73	6.02	49.07	0.90	0.52
IG-5	0-10	7.37	6.51	142.47	7.73	4.50
	10-20	7.57	6.28	55.4	1.67	0.97
IG-6	0-10	8.22	7.13	124.73	1.36	0.79
	10-20	8.36	7.26	126.33	1.13	0.66
IG-7	0-10	8.06	7.12	109.07	1.83	1.07
	10-20	7.81	6.40	46.33	0.60	0.35

Peak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
8,8714	95,59	0,1181	9,96807	6,38
12,4052	6,44	0,4723	7,13538	0,43
17,7760	29,46	0,1574	4,98977	1,97
20,8597	225,40	0,1574	4,25858	15,05
23,6786	8,04	0,9446	3,75759	0,54
25,6418	21,41	0,1181	3,47419	1,43
26,6691	1497,56	0,1574	3,34265	100,00
27,5825	258,75	0,1181	3,23400	17,28
27,9355	33,67	0,1574	3,19393	2,25
29,8798	13,96	0,3149	2,99038	0,93
31,3333	19,15	0,1181	2,85490	1,28
34,8344	12,34	0,4723	2,57557	0,82
36,5628	79,78	0,1181	2,45769	5,33
39,4755	69,76	0,1181	2,28280	4,66
40,3000	32,80	0,1181	2,23798	2,19
42,4615	50,02	0,1181	2,12893	3,34
45,7899	43,61	0,1181	1,98162	2,91
50,1346	117,67	0,1574	1,81961	7,86
54,8647	28,49	0,1920	1,67201	1,90



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
3,3746	42,77	0,7872	26,18238	15,33
5,7377	70,14	0,6298	15,40345	25,15
7,2758	64,85	0,3936	12,15022	23,25
8,8206	32,99	0,2362	10,02546	11,83
13,7167	5,89	0,4723	6,45593	2,11
19,8014	17,00	0,4723	4,48374	6,09
20,8560	94,46	0,1181	4,25932	33,86
23,0281	25,71	0,1181	3,86226	9,22
23,5395	117,92	0,1181	3,77948	42,27
25,5876	31,80	0,3149	3,48142	11,40
26,6491	278,94	0,1181	3,34511	100,00
27,5181	120,45	0,1181	3,24142	43,18
27,9547	230,75	0,1574	3,19178	82,72
29,3918	58,43	0,1574	3,03891	20,95
33,8830	34,92	0,1181	2,64567	12,52
35,1516	19,94	0,7872	2,55305	7,15
36,5142	19,17	0,1181	2,46085	6,87
39,4890	23,41	0,1968	2,28205	8,39
42,4431	56,65	0,1574	2,12981	20,31
45,4656	6,51	0,9446	1,99500	2,33
47,4967	11,70	0,2362	1,91432	4,19
50,0963	22,23	0,1181	1,82091	7,97
54,8726	20,56	0,2880	1,67179	7,37

**ANEXO III: CONTENIDOS TOTALES DE ELEMENTOS EN  
HORIZONTE SUPERFICIAL, SUBSUPERFICIAL Y ROCA.  
PRIMER MUESTREO.**



ANEXO III: Contenidos totales de elementos (mg/kg) en horizonte superficial. Primer muestreo.

Perfil	Al (%)	As	Ba	Ca (%)	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe (%)	K (%)	La
IV-1	5,48	0,00577	480	0,09	0,00167	51	11	106	0,02099	2,88	2,20	28
IV-2	5,15	0,00408	428	0,14	0,00163	78	12	142	0,01318	2,49	1,96	41
IV-4	4,16	0,00598	418	0,01	0,0022	55	8	153	0,01242	2,38	1,41	31
IV-6	5,49	0,00843	527	0,01	0,00236	67	11	99	0,01781	3,40	2,02	36
IV-7	6,72	0,00108	469	0,30	0,01453	62	13	97	0,02531	3,82	2,30	35
IV-8	6,53	0,00311	700	0,01	0,02386	77	12	61	0,01365	2,84	2,53	41
IV-11	7,17	0,00797	343	0,06	0,00435	71	22	76	0,03646	3,97	1,86	41
IV-13	3,72	0,01105	209	13,80	0,00779	31	7	32	0,01502	1,43	1,23	19
IV-15	4,95	0,01101	402	0,48	0,00187	87	10	73	0,01731	2,49	2,21	45
IV-16	4,41	0,01063	308	4,05	0,00125	35	4	64	0,01125	1,17	2,35	20
IV-17	4,44	0,01598	277	5,53	0,00183	39	6	61	0,00923	1,26	2,08	22
IV-19	4,25	0,00681	409	0,13	0,02001	64	4	89	0,01163	1,06	2,66	33
IV-20	4,95	0,00831	356	0,22	0,01995	60	4	67	0,01268	1,30	2,72	31
IV-21	4,04	0,00503	423	0,21	0,00023	57	4	87	0,01372	0,94	2,69	30
IV-22	3,52	0,00170	390	0,15	0,00200	55	4	100	0,00480	0,87	2,46	29
IV-23	8,22	0,00190	664	0,14	0,00200	37	22	82	0,00350	4,52	2,60	22

Perfil	Mg (%)	Mn	Na(%)	Ni	P	Pb	Sc	Ti (%)	V	Y	Zn
IV-1	0,70	404	0,69	30	621	32	9	0,31	71	8	70
IV-2	0,47	970	0,53	23	429	29	8	0,27	51	12	48
IV-4	0,23	535	0,13	18	571	29	7	0,26	45	14	52
IV-6	0,38	293	0,26	25	390	29	9	0,30	64	21	61
IV-7	0,84	621	1,02	35	497	33	11	0,30	82	7	43
IV-8	0,41	729	0,22	22	423	35	9	0,36	64	16	60
IV-11	0,62	309	0,48	57	782	41	11	0,28	83	15	104
IV-13	3,29	233	0,28	20	937	24	5	0,09	37	8	43
IV-15	0,50	359	0,38	20	544	30	7	0,34	46	13	50
IV-16	0,71	208	0,21	11	644	25	5	0,11	25	9	28
IV-17	0,44	294	0,48	12	360	25	5	0,11	29	10	29
IV-19	0,20	176	0,42	9	440	36	4	0,12	22	11	29
IV-20	0,32	191	0,49	11	449	28	4	0,14	25	11	34
IV-21	0,18	294	0,45	9	789	35	4	0,10	20	10	25
IV-22	0,14	152	0,41	9	476	26	3	0,09	18	9	28
IV-23	0,80	566	0,34	38	738	48	12	0,10	98	6	117

ANEXO III: Contenidos totales de elementos (mg/kg) en horizonte subsuperficial. Primer muestreo.

Perfil	Al (%)	As	Ba	Ca (%)	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe (%)	K (%)	La
IV-1	5,61	<b>0,06560</b>	351	0,34	0,00126	57	9	203	0,01390	3,74	1,67	33
IV-2	4,52	0,00376	326	0,01	0,00003	66	11	156	0,01096	2,31	1,53	35
IV-4	3,66	0,00614	465	0,01	0,00001	41	8	100	0,01298	2,10	1,59	22
IV-6	5,40	0,01318	473	0,01	0,00143	86	12	100	0,0215	3,91	1,74	46
IV-7	6,70	0,00126	482	0,26	0,00039	63	14	102	0,02833	3,88	2,36	36
IV-8	6,70	0,00377	716	0,01	0,00178	82	11	62	0,0125	2,94	2,61	42
IV-11	5,77	0,00754	332	0,01	0,00065	50	23	82	0,03243	3,95	1,95	29
IV-13	4,01	0,01233	225	<b>13,80</b>	0,00168	31	7	32	0,01463	1,57	1,33	19
IV-15	4,97	0,01103	420	0,34	<b>0,01317</b>	70	10	84	0,01404	2,43	2,34	37
IV-16	4,72	0,01182	326	<b>4,28</b>	0,00282	42	4	74	0,00932	1,23	2,46	24
IV-17	4,33	0,02012	271	<b>6,19</b>	0,00501	42	5	57	0,00933	1,24	1,98	24
IV-19	3,81	0,00597	398	0,19	<b>0,04981</b>	63	4	79	0,01406	0,96	2,47	33
IV-20	4,86	0,00824	361	0,12	0,00065	60	5	72	0,01102	1,32	2,75	31
IV-21	4,07	0,00544	431	0,20	0,00028	60	4	87	0,01299	0,94	2,74	31
IV-22	3,14	0,00240	373	0,02	0,00190	42	3	92	0,00380	0,80	2,42	23
IV-23	5,91	0,00730	534	0,01	0,00190	27	20	76	0,01570	3,73	2,29	16

Perfil	Mg (%)	Mn	Na(%)	Ni	P	Pb	Sc	Ti (%)	V	Y	Zn
IV-1	0,66	<b>897</b>	0,60	26	441	20	11	0,26	58	18	51
IV-2	0,41	627	0,42	19	289	24	7	0,23	45	12	37
IV-4	0,20	609	0,15	17	497	29	5	0,27	49	9	47
IV-6	0,37	481	0,22	24	497	28	10	0,31	58	27	57
IV-7	0,85	652	0,99	36	492	35	11	0,31	85	7	43
IV-8	0,43	669	0,22	22	439	35	9	0,37	65	16	59
IV-11	0,57	255	0,52	52	640	38	10	0,32	90	12	<b>97</b>
IV-13	<b>3,18</b>	244	0,31	22	<b>1097</b>	22	6	0,10	40	9	40
IV-15	0,45	348	0,38	20	496	31	7	0,32	45	12	47
IV-16	0,70	200	0,20	11	553	25	5	0,11	26	9	34
IV-17	0,45	292	0,45	12	346	24	5	0,11	28	10	27
IV-19	0,19	172	0,41	9	464	44	3	0,10	20	10	34
IV-20	0,31	187	0,50	9	393	31	5	0,14	26	11	29
IV-21	0,17	294	0,45	9	<b>811</b>	32	4	0,10	21	11	27
IV-22	0,12	130	0,40	9	327	25	3	0,07	17	8	18
IV-23	0,63	362	0,27	34	502	35	9	0,08	86	4	<b>83</b>

ANEXO III: Contenidos totales de elementos (mg/kg) en roca. Primer muestreo.

		Al (%)	As (µg/kg)	Ba	Ca (%)	Cd (µg/kg)	Ce	Co	Cr	Cu (µg/kg)	Fe (%)	K (%)	La
IV-1	RS	5.82	0.35	483	0.19	2.71	70	8	166	29.42	2.79	2.50	37
IV-2	RS	4.50	5.24	308	0.01	2.70	63	11	200	11.49	2.70	1.52	34
	RS	1.77	0.68	166	<0.01	1.90	38	4	202	7.58	0.97	0.64	21
IV-4	RI	2.24	2.04	220	<0.01	2.89	25	4	198	14.47	1.52	0.82	15
	RS	0.05	0.40	5	<0.01	4.72	<5	<2	265	3.67	0.20	<0.01	<5
IV-6	RI	1.15	1.25	89	<0.01	0.38	28	1	212	5.09	0.65	0.06	17
	RS	0.14	3.18	10	<0.01	3.69	<5	<2	265	10.36	0.52	<0.01	<5
IV-7	RS	0.15	0.09	8	<0.01	<0.02	4	1	252	4.10	0.29	0.01	4
IV-8	RI	3.95	0.51	500	<0.01	11.64	26	6	160	6.56	1.69	0.20	22
	RS	4.23	0.81	602	<0.01	1.08	43	6	115	4.47	1.58	0.25	29
	RS	5.05	0.53	698	0.04	4.38	69	8	119	11.43	2.54	0.31	46
IV-11	RI	7.53	0.96	359	<0.01	1.70	29	11	115	28.94	6.19	1.05	18
	RS	6.57	3.17	352	<0.01	1.02	34	11	115	28.82	5.85	1.00	19
IV-13	RI	0.24	1.22	14	30.20	19.11	4	2	5	2.39	0.02	5.50	4
	RS	0.16	1.09	6	27.60	4.33	<5	<2	5	2.72	<0.01	8.60	<5
IV-15	RS	5.39	11.18	413	0.54	1.50	70	11	68	17.25	2.76	0.58	37
	RS	0.18	1.83	14	<0.01	0.28	15	<2	179	1.15	0.18	<0.01	8
IV-17	RI	0.47	7.37	52	0.79	1.32	17	1	183	3.33	0.44	0.01	9
	RS	2.53	13.99	299	0.06	<0.02	34	4	209	7.74	0.93	0.24	18

		Mg (%)	Mn	Na(%)	Ni	P	Pb	Sc	Ti (%)	V	Y	Zn
IV-1	RS	0.75	363	0.85	19	424	21	8	0.36	59	8	44
IV-2	RS	0.37	785	0.38	20	289	22	8	0.23	45	15	37
	RS	0.07	110	0.04	12	377	<10	2	0.16	18	9	<10
IV-4	RI	0.18	107	0.09	11	463	9	3	0.12	24	7	28
	RS	<0.01	24	<0.01	<10	<100	<10	<1	<0.01	4	<1	<10
IV-6	RI	0.06	79	0.10	9	246	9	2	0.09	15	5	11
	RS	<0.01	52	<0.01	<10	<100	<10	<1	<0.01	5	<1	<10
IV-7	RS	0.01	56	0.01	9	90	9	1	0.01	5	1	9
IV-8	RI	0.20	200	0.06	13	136	20	6	0.29	43	11	25
	RS	0.25	163	0.47	14	216	22	6	0.30	39	18	25
	RS	0.31	332	0.11	17	364	25	8	0.45	55	27	39
IV-11	RI	1.05	229	0.77	29	437	33	13	0.30	124	8	108
	RS	1.00	287	0.82	26	458	51	11	0.43	128	10	116
IV-13	RI	5.50	41	0.01	9	134	9	1	0.01	7	1	9
	RS	8.60	24	<0.01	<10	<100	<10	<1	<0.01	3	<1	<10
IV-15	RS	0.58	384	0.41	23	455	41	8	0.32	53	13	51
	RS	<0.01	126	<0.01	<10	<100	<10	<1	<0.01	6	<1	<10
IV-17	RI	0.01	37	0.01	9	90	9	1	0.02	10	2	9
	RS	0.20	266	0.20	13	404	<10	3	0.06	25	8	16

RI: Roca incluída; RS: Roca superficial

**ANEXO IV: CONTENIDOS TOTALES DE ELEMENTOS EN  
HORIZONTE SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL. SEGUNDO  
MUESTREO.**

ANEXO IV: Contenidos totales de elementos (mg/kg) en horizonte superficial y subsuperficial. Segundo muestreo.

Perfil	Prof. (cm)	Ag	Al (%)	As	Ba	Be	Ca (%)	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe (%)	K (%)	La
IG-1	0-10	0	6,19	0,011	347	1	0,26	0	68	11	75	8	2,16	1,89	33
	10-20	0	10,16	0,024	424	2	0,19	0	68	13	108	20	4,49	2,12	36
IG-2	0-10	0	<b>10,97</b>	0,022	<b>479</b>	2	0,26	0	<b>92</b>	<b>18</b>	98	<b>21</b>	<b>5,41</b>	2,45	<b>47</b>
	10-20	1	<b>10,97</b>	0,024	<b>463</b>	2	0,18	0	<b>96</b>	<b>20</b>	96	<b>25</b>	<b>5,30</b>	2,50	<b>49</b>
IG-3	0-10	1	5,70	0,011	492	1	0,32	0	64	9	100	7	1,88	2,32	29
	10-20	0	4,93	0,010	460	1	0,34	0	59	8	109	5	1,51	2,05	27
IG-4	0-10	1	7,87	0,006	154	2	0,54	0	23	2	97	2	0,98	3,45	10
	10-20	0	8,67	0,007	162	2	0,50	0	23	2	103	5	1,04	3,59	10
IG-5	0-10	1	7,06	0,005	89	1	0,82	0	21	3	105	27	1,18	3,18	9
	10-20	1	7,35	0,005	77	1	0,37	0	19	2	116	26	1,14	3,49	8
IG-6	0-10	1	7,10	0,005	265	3	<b>2,45</b>	0	44	5	61	12	1,80	2,78	21
	10-20	0	6,94	0,006	251	3	<b>2,31</b>	0	42	4	63	11	1,57	2,78	20
IG-7	0-10	1	6,25	0,003	366	2	0,37	0	32	4	135	5	0,81	3,37	15
	10-20	0	6,23	0,002	362	2	0,30	0	33	4	142	7	0,78	3,38	15

Perfil	Mg (%)	Mn	Mo	Na(%)	Nb	Ni	P	Pb	Sb	Sc	Ti (%)	V	W	Y	Zn
IG-1	0,09	327	1	0,44	4	16	256	21	1	7	0,21	40	2	14	51
	0,25	145	1	0,26	6	27	261	21	0	12	0,33	75	4	19	79
IG-2	0,77	<b>686</b>	0	1,04	1	<b>29</b>	<b>717</b>	38	0	<b>16</b>	0,21	<b>112</b>	2	14	<b>100</b>
	0,71	<b>720</b>	0	1,00	2	<b>30</b>	<b>856</b>	37	0	<b>16</b>	0,23	<b>111</b>	2	15	<b>99</b>
IG-3	0,23	330	1	0,48	4	14	248	16	0	6	0,21	35	2	12	38
	0,16	351	1	0,42	3	12	238	14	2	5	0,19	31	2	10	33
IG-4	0,21	206	1	2,18	4	3	894	15	1	3	0,01	6	6	10	32
	0,20	208	1	2,35	5	4	878	14	1	3	0,01	6	6	12	29
IG-5	0,42	297	1	1,57	4	5	763	20	1	4	0,03	9	3	7	80
	0,10	226	1	1,79	4	6	631	16	1	4	0,02	7	3	6	88
IG-6	<b>1,90</b>	374	0	1,42	6	8	496	21	0	6	0,17	23	3	<b>18</b>	<b>75</b>
	<b>1,67</b>	335	1	1,42	5	7	453	21	1	6	0,16	21	3	<b>16</b>	<b>62</b>
IG-7	0,14	348	1	1,18	2	10	348	22	0	3	0,07	11	3	9	29
	0,12	337	1	1,23	2	7	279	21	0	3	0,06	11	3	10	27

## **ANEXO V: ÍNDICES DE ACUMULACIÓN EDÁFICA Y FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO**

## ANEXO V: INDICES DE ACUMULACIÓN EDÁFICA

		Al	As	Ba	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	K	La
IV-1	RS	0,94	16,49	0,99	0,47	0,62	0,73	1,34	0,64	0,71	1,03	0,88	0,76
IV-2	RS	2,91	6	2,58	0,14	8,58	3,05	3	0,7	1,74	2,57	3,06	1,95
IV-4	RI	1,86	2,93	1,9	n.d.	0,76	2,2	2	0,77	0,86	1,57	1,72	2,07
	RS	83,2	14,95	83,6	n.d.	0,47	n.d.	n.d.	0,58	3,38	11,9	n.d.	n.d.
IV-6	RI	4,77	6,74	5,92	n.d.	6,21	3,39	n.d.	0,47	3,5	5,23	5,94	2,12
	RS	39,2	2,65	52,7	n.d.	0,64	n.d.	n.d.	0,37	1,72	6,54	n.d.	n.d.
IV-7	RS	44,8	12	58,63	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,38	6,17	13,17	115	n.d.
IV-8	RI	1,65	6,09	1,4	n.d.	2,05	3,96	2	0,38	2,08	1,68	1,55	1,86
	RS	1,54	3,84	1,16	n.d.	22,09	1,79	2	0,53	3,05	1,8	1,41	1,41
	RS	1,29	5,87	1	n.d.	5,45	1,12	1,5	0,51	1,19	1,12	1,17	0,89
IV-11	RI	0,95	8,3	0,96	n.d.	2,56	3,45	2	0,66	1,26	0,64	0,89	2,28
	RS	1,09	2,51	0,97	n.d.	4,26	2,09	2	0,66	1,27	0,68	0,89	2,16
IV-13	RI	15,5	3,06	14,93	0,46	0,41	n.d.	n.d.	6,4	6,28	71,5	24,6	n.d.
	RS	23,25	10,14	34,83	0,5	1,8	n.d.	n.d.	6,4	5,52	n.d.	41	n.d.
IV-15	RS	27,5	6,02	28,71	n.d.	6,68	5,8	n.d.	0,41	15,05	13,83	76,67	5,63
IV-17	RI	9,45	2,17	5,33	7	1,39	2,29	n.d.	0,33	2,77	2,86	18,91	2,44
	RS	1,75	1,14	0,93	92,17	n.d.	1,15	1,5	0,29	1,19	1,35	1,35	1,22
		Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sc	Ti	V	Y	Zn	
IV-1	RS	0,93	1,11	0,81	1,58	1,46	1,52	1,13	0,86	1,2	1	1,59	
IV-2	RS	6,71	8,82	13,25	1,92	1,14	n.d.	4	1,69	2,83	1,33	n.d.	
IV-4	RI	1,28	5	1,44	1,64	1,23	n.d.	2,33	2,17	1,88	2	1,86	
	RS	n.d.	22,29	n.d.	2,00	-	n.d.	-	-	11,25	n.d.	n.d.	
IV-6	RI	6,33	3,71	2,6	2,78	1,59	n.d.	4,5	3,33	4,27	4,2	5,55	
	RS	n.d.	5,63	n.d.	2,78	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	12,8	n.d.	n.d.	
IV-7	RS	n.d.	11,09	n.d.	3,89	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16,4	n.d.	n.d.	
IV-8	RI	2,05	3,65	3,67	1,69	3,11	1,25	1,5	1,24	1,49	1,45	2,4	
	RS	1,64	4,47	0,47	1,57	1,96	1,59	1,5	1,2	1,64	0,89	2,4	
	RS	1,32	2,2	2	1,29	1,16	1,4	1,13	0,8	1,16	0,59	1,54	
IV-11	RI	0,59	1,35	0,62	1,97	1,79	1,24	0,85	0,93	83	1,88	0,96	
	RS	0,62	1,08	0,59	2,19	1,71	0,8	1	0,65	0,65	1,5	0,9	
IV-13	RI	0,6	5,68	n.d.	2,22	6,99	n.d.	n.d.	n.d.	37	n.d.	n.d.	
	RS	0,38	9,71	n.d.	2,22	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	12,33	n.d.	n.d.	
IV-15	RS	n.d.	2,85	n.d.	2,22	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	46	n.d.	n.d.	
IV-17	RI	n.d.	7,95	n.d.	1,33	n.d.	n.d.	n.d.	5,5	2,9	5	n.d.	
	RS	1,83	1,1	2,4	0,92	0,89	n.d.	1,67	1,83	1,16	1,25	1,81	

RI: roca incluida, RS: roca superficial

## ANEXO V: FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO

	As	Ba	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	K	La
IV-1	17,51	1,06	0,50	0,65	0,77	1,46	0,68	0,76	1,10	0,93	0,80
IV-2	2,06	0,89	-	0,29	0,21	1,03	0,24	0,60	0,88	1,05	0,67
IV-4	1,58	1,02	-	0,41	1,18	1,08	0,42	0,46	0,84	0,93	1,11
IV-6	1,41	1,24	-	1,30	0,50	<b>2,30</b>	0,10	0,73	1,10	1,24	0,44
IV-7	0,27	1,31	-		0,35	0,29	0,01	0,14	0,29	<b>2,57</b>	0,20
IV-8	<b>3,69</b>	0,85	-	1,24	1,79	1,21	0,23	1,26	1,02	0,94	1,13
IV-11	<b>8,72</b>	1,00	-	<b>2,69</b>	<b>2,57</b>	<b>2,10</b>	0,69	1,32	0,67	0,93	<b>2,39</b>
IV-13	0,58	0,96	0,03	0,03	0,50	0,23	0,41	0,41	<b>4,61</b>	1,59	0,31
IV-15	0,22	1,04	-	0,24	0,21	-	0,01	0,55	0,50	2,68	0,20
IV-16	0,96	1,01	1,01	0,47	0,89	1,07	0,93	1,00	1,00	1,00	1,00
IV-17	0,23	0,56	0,74	0,15	0,24	0,64	0,04	0,29	0,30	<b>2,00</b>	0,26

	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sc	Ti	V	Y	Zn
IV-1	0,99	1,18	0,86	1,68	1,56	1,62	1,19	0,91	1,28	1,06	1,69
IV-2	2,31	3,03	4,55	0,66	0,39	-	1,37	0,58	0,97	0,46	-
IV-4	0,69	<b>2,69</b>	0,78	0,88	0,66	1,74	1,26	1,17	1,01	1,08	1,00
IV-6	1,33	0,78	0,54	0,58	0,33	0,67	0,94	0,70	0,89	0,88	1,16
IV-7	1,88	0,25	<b>2,28</b>	0,09	0,12	0,08	0,25	0,67	0,37	0,16	0,11
IV-8	1,24	<b>2,20</b>	<b>2,22</b>	1,02	1,88	1,06	0,91	0,75	0,90	0,88	1,45
IV-11	0,62	1,42	0,65	<b>2,06</b>	1,88	1,30	0,89	0,98	0,70	1,97	1,01
IV-13	0,04	0,37	1,81	0,14	0,45	0,17	0,32	0,58	0,34	0,52	0,31
IV-15	-	0,10	-	-	-	-	-	-	0,28	-	-
IV-16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,25	1,07	1,07	1,07	1,03	1,07	0,88
IV-17	<b>4,66</b>	0,84	<b>5,08</b>	0,14	0,42	0,29	0,53	0,58	0,31	0,53	0,34



**ANEXO VI: ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE ELEMENTOS  
EN HORIZONTE SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL.  
PRIMER MUESTREO.**

ANEXO VI: ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE ELEMENTOS (mg/kg) EN HORIZONTE SUPERFICIAL. PRIMER MUESTREO.

0-10 cm	Al (%)	As	Ba	Ca(%)	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe(%)	K(%)	La
X	5,20	0,0068	425,19	1,58	0,007	57,88	9,63	86,81	0,015	2,30	2,21	31,50
p <sub>25</sub>	4,23	0,0038	352,75	0,08	0,002	48,00	4,00	66,25	0,012	1,24	2,01	26,50
p <sub>75</sub>	5,75	0,0090	471,75	0,35	0,009	68,00	12,00	99,25	0,017	3,01	2,55	37,25
ε	0,33	0,0010	31,88	0,91	0,002	4,10	1,46	7,58	0,002	0,30	0,11	2,02
m	4,95	0,006395	413,5	0,145	0,0021	58,5	9	84,5	0,013	2,44	2,26	31
m/x	<b>0,95</b>	<b>0,94</b>	<b>0,97</b>	0,09	0,31	<b>1,01</b>	<b>0,94</b>	<b>0,97</b>	<b>0,90</b>	<b>1,06</b>	<b>1,02</b>	<b>0,98</b>
s	1,34	0,004	127,52	3,63	0,01	16,40	5,85	30,34	0,01	1,20	0,44	8,07
V	1,79	0,00002	16261	13	0,0001	269	34	920	0,00	1,43	0,19	650
Curtosis	0,13	0,08	0,81	9,24	0,09	-0,72	0,74	0,88	2,95	-1,12	0,44	-0,98
Coefficiente de asimetría	0,91	0,53	0,73	2,96	1,30	-0,08	1,10	0,68	1,33	0,41	-0,94	-0,01
Mínimo	3,52	0,0011	209	0,01	0,0002	31	4	32	0,004	0,87	1,23	19
Máximo	8,22	0,016	700	13,8	0,024	87	22	153	0,036	4,52	2,72	45
N.C. (95%)	0,71	0,002	67,95	1,94	0,004	8,74	3,12	16,17	0,004	0,64	0,23	4,30

0-10 cm	Mg(%)	Mn	Na(%)	Ni	P	Pb	Sc	Ti(%)	V	Y	Zn
X	0,64	395,88	0,42	21,81	568,13	31,56	7,06	0,21	48,75	11,25	51,31
p <sub>25</sub>	0,30	226,75	0,28	11,00	437,25	27,50	4,75	0,11	25,00	8,75	29,00
p <sub>75</sub>	0,70	542,75	0,48	26,25	667,50	35,00	9,00	0,30	65,75	13,25	60,25
ε	0,19	57,43	0,05	3,29	42,24	1,60	0,72	0,03	6,40	0,96	6,72
m	0,46	301,50	0,42	20	520,5	29,5	7	0,2	45,5	10,5	45,5
m/x	0,71	0,76	<b>0,98</b>	<b>0,92</b>	<b>0,92</b>	<b>0,93</b>	<b>0,99</b>	<b>0,98</b>	<b>0,93</b>	<b>0,93</b>	<b>0,89</b>
s	0,74	229,71	0,21	13	169	6,40	2,89	0,10	25,61	3,86	26,88
V	0,55	52767	0,05	173	28547	41	8	0,01	656	15	722
Curtosis	12,69	1,11	3,27	2,12	-0,27	1,63	-1,25	-1,94	-0,99	1,33	1,66
Coefficiente de asimetría	3,41	1,24	1,42	1,37	0,80	1,22	0,27	0,13	0,48	1,06	1,43
Mínimo	0,14	152	0,13	9	360	24	3	0,09	18	6	25
Máximo	3,29	970	1,02	57	937	48	12	0,36	98	21	117
N.C. (95%)	0,39	122,40	0,11	7,01	90,03	3,41	1,54	0,06	13,64	2,05	14,32

X: valor promedio

p<sub>25</sub>: percentil del 25%

p<sub>75</sub>: percentil del 75%

V: varianza de la muestra

m: mediana

ε: error típico

s: Desviación estándar

N.C.: nivel de confianza para la media

ANEXO VI: ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE ELEMENTOS (mg/kg) EN HORIZONTE SUBSUPERFICIAL. PRIMER MUESTREO.

10-20 cm	Al (%)	As	Ba	Ca (%)	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe (%)	K (%)	La
<b>Media</b>	4,89	0,01	405,25	1,61	0,005	55,13	9,38	91,13	0,01	2,32	2,14	30,06
p25	4,06	0,01	330,50	0,01	0,001	42,00	4,75	73,50	0,01	1,24	1,72	23,75
p75	5,65	0,01	467,00	0,34	0,002	63,75	11,25	100,00	0,01	3,73	2,46	35,25
$\epsilon$	0,26	0,004	29,05	0,93	0,003	4,24	1,45	9,94	0,0018	0,30	0,11	2,07
<b>m</b>	4,79	0,01	385,50	0,16	0,002	58,50	8,50	83,00	0,01	2,21	2,32	31,00
<b>m/x</b>	<b>0,98</b>	0,64	<b>0,95</b>	0,10	0,30	<b>1,06</b>	<b>0,91</b>	<b>0,91</b>	<b>0,91</b>	<b>0,95</b>	<b>1,08</b>	<b>1,03</b>
<b>s</b>	1,06	0,02	116,19	3,70	0,012	16,94	5,81	39,75	0,01	1,21	0,46	8,30
<b>V</b>	1,12	0,0002	13500	13,73	0,0002	287	34	1580	0,0001	1,47	0,21	69
<b>Curtosis</b>	-0,72	12,33	2,40	8,26	13,49	-0,57	0,91	3,84	1,98	-1,67	-1,22	-0,50
<b>Coefficiente de asimetría</b>	0,28	3,37	1,13	2,82	3,60	0,13	1,15	1,68	1,34	0,24	-0,35	0,13
<b>Mínimo</b>	3,14	0,0013	225	0,009	0,00001	27	3	32	0,004	0,8	1,33	16
<b>Máximo</b>	6,7	0,0656	716	13,8	0,0498	86	23	203	0,032	3,95	2,75	46
<b>N.C. (95%)</b>	0,56	0,008	61,91	1,97	0,007	9,03	3,09	21,18	0,004	0,65	0,24	4,42

10-20 cm	Mg(%)	Mn	Na(%)	Ni	P	Pb	Sc	Ti (%)	V	Y	Zn
<b>Media</b>	0,61	401,19	0,41	20,69	517,75	29,88	6,88	0,20	47,44	11,56	45,63
p25	0,28	233,00	0,26	10,50	427,50	24,75	5,00	0,10	26,00	9,00	32,75
p75	0,64	613,50	0,46	24,50	514,75	35,00	9,25	0,31	59,75	12,00	52,50
$\epsilon$	0,18	56,54	0,05	3,01	49,53	1,62	0,69	0,03	6,12	1,32	5,20
<b>m</b>	0,44	321,00	0,41	19,50	494,00	30,00	6,50	0,19	45,00	10,50	41,50
<b>m/x</b>	0,73	0,80	<b>1,00</b>	<b>0,94</b>	<b>0,95</b>	<b>1,00</b>	<b>0,95</b>	<b>0,93</b>	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	<b>0,91</b>
<b>s</b>	0,72	226,17	0,20	12,02	198,11	6,49	2,78	0,11	24,48	5,27	20,81
<b>V</b>	0,51	51152	0,04	145	39248	42	7,72	0,01	599	28	433
<b>Curtosis</b>	12,86	-0,38	3,95	1,72	4,41	-0,16	-1,40	-1,81	-0,91	4,44	1,56
<b>Coefficiente de asimetría</b>	3,44	0,78	1,56	1,26	1,90	0,47	0,19	0,19	0,52	1,78	1,26
<b>Mínimo</b>	0,12	130	0,15	9	289	20	3	0,07	17	4	18
<b>Máximo</b>	3,18	897	0,99	52	1097	44	11	0,37	90	27	97
<b>N.C. (95%)</b>	0,38	120,52	0,11	6,41	105,57	3,46	1,48	0,06	13,04	2,81	11,09

X: valor promedio

p25: percentil del 25%

p75: percentil del 75%

V: varianza de la muestra

$\epsilon$ : error típico

m: mediana

s: Desviación estándar

N.C.: nivel de confianza para la media

**ANEXO VII: ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE ELEMENTOS  
EN HORIZONTE SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL.  
SEGUNDO MUESTREO.**

ANEXO VII: ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE ELEMENTOS (mg/kg) EN HORIZONTE SUPERFICIAL. SEGUNDO MUESTREO.

	Ag	Al (%)	As	Ba	Be	Ca (%)	Ce	Co	Cr	Cu	Fe (%)	K (%)	La
<b>Media</b>	0,71	7,31	9,00	313,14	1,71	0,72	49,14	7,43	95,86	0,012	2,03	2,78	23,43
<b>p<sub>25</sub></b>	0,50	6,22	5,00	209,50	1,00	0,29	27,50	3,50	86,00	0,006	1,08	2,39	12,50
<b>p<sub>75</sub></b>	1,00	7,49	11,00	422,50	2,00	0,68	66,00	10,00	102,50	0,017	2,02	3,28	31,00
<b>Error típico</b>	0,18	0,67	2,46	58,01	0,29	0,30	10,01	2,15	8,85	3,43	0,59	0,22	5,22
<b>Mediana</b>	1	7,06	6	347	2	0,37	44	5	98	0,008	1,8	2,78	21
<b>m/x</b>	1,4	<b>0,97</b>	0,67	<b>1,11</b>	<b>1,17</b>	0,52	<b>0,90</b>	0,67	<b>1,02</b>	0,68	0,89	<b>1,00</b>	<b>0,90</b>
<b>S</b>	0,49	1,77	6,51	153	0,76	0,79	26	5,68	23	9	1,57	0,59	13,81
<b>V</b>	0,24	3,13	42	23554	0,57	0,62	701	32	548	83	2,47	0,34	191
<b>Curtosis</b>	-0,84	3,64	2,54	-1,23	-0,35	5,58	-0,91	0,91	0,84	-0,36	4,86	-1,36	-0,28
<b>C. Asim.</b>	-1,23	1,80	1,56	-0,32	0,60	2,32	0,54	1,18	0,17	0,93	2,10	-0,29	0,72
<b>Mínimo</b>	0	5,7	3	89	1	0,26	21	2	61	0,002	0,81	1,89	9
<b>Máximo</b>	1	10,97	22	492	3	2,45	92	18	135	0,027	5,41	3,45	47
<b>N.C.(95%)</b>	0,45	1,64	6,02	141,94	0,70	0,73	24,49	5,26	21,65	8,40	1,45	0,54	12,77

	Mg (%)	Mn	Mo	Na(%)	Nb	Ni	P	Pb	Sb	Sc	Ti (%)	V	W	Y	Zn
<b>Media</b>	0,54	366,86	0,71	1,19	3,57	12,14	531,71	21,86	0,43	6,43	0,13	33,71	3,00	12,00	57,86
<b>p<sub>25</sub></b>	0,18	312,00	0,50	0,76	3,00	6,50	302,00	18,00	0,00	3,50	0,05	10,00	2,00	9,50	35,00
<b>p<sub>75</sub></b>	0,60	361,00	1,00	1,50	4,00	15,00	740,00	21,50	1,00	6,50	0,21	37,50	3,00	14,00	77,50
<b>Error típico</b>	0,24	56,90	0,18	0,23	0,61	3,31	98,88	2,87	0,20	1,70	0,03	13,96	0,53	1,40	10,35
<b>Mediana</b>	0,23	330	1	1,18	4	10	496	21	0	6	0,17	23	3	12	51
<b>m/x</b>	0,43	<b>0,90</b>	1,40	<b>0,99</b>	<b>1,12</b>	0,82	<b>0,93</b>	<b>0,96</b>	0,00	<b>0,93</b>	1,31	0,68	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	0,88
<b>S</b>	0,64	151	0,49	0,61	1,62	8,75	262	7,60	0,53	4,50	0,09	37	1,41	3,70	27
<b>V</b>	0,41	22660	0,24	0,38	2,62	76	68436	58	0,29	20	0,01	1363	2	14	750
<b>Curtosis</b>	4,23	4,66	-0,84	-0,30	0,37	1,85	-1,95	4,56	-2,80	4,47	-2,26	4,34	4,40	-0,28	-1,44
<b>C. Asim.</b>	2,04	1,91	-1,23	0,27	-0,34	1,27	0,21	1,95	0,37	2,00	-0,43	2,00	1,98	0,33	0,47
<b>Mínimo</b>	0,09	206	0	0,44	1	3	248	15	0	3	0,01	6	2	7	29
<b>Máximo</b>	1,9	686	1	2,18	6	29	894	38	1	16	0,21	112	6	18	100
<b>N.C.(95%)</b>	0,60	139,22	0,45	0,57	1,50	8,09	241,94	7,03	0,49	4,17	0,08	34,15	1,31	3,42	25,34

p<sub>25</sub>: percentil al 25%

p<sub>75</sub>: percentil al 75%

C. Asim: coeficiente de asimetría

V: varianza de la muestra

s: desviación estándar

NC: nivel de confianza para la media

ANEXO VII: ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE ELEMENTOS (mg/kg) EN HORIZONTE SUBSUPERFICIAL. SEGUNDO MUESTREO.

	Ag	Al (%)	As	Ba	Be	Ca (%)	Ce	Co	Cr	Cu	Fe (%)	K (%)	La
<b>Media</b>	0,29	7,89	11,14	314,14	1,86	0,60	48,57	7,57	105,29	0,014	2,26	2,84	23,57
<b>p<sub>25</sub></b>	0,00	6,59	5,50	206,50	1,50	0,25	28,00	3,00	99,50	0,006	1,09	2,31	12,50
<b>p<sub>75</sub></b>	0,50	9,42	17,00	442,00	2,00	0,44	63,50	10,50	112,50	0,0225	3,03	3,44	31,50
<b>Error típico</b>	0,18	0,82	3,44	57,97	0,26	0,29	10,41	2,54	8,95	3,52	0,69	0,25	5,62
<b>Mediana</b>	0	7,35	7	362	2	0,34	42	4	108	0,011	1,51	2,78	20
<b>m/x</b>	0	<b>0,93</b>	0,63	<b>1,15</b>	<b>1,1</b>	0,57	0,86	0,53	<b>1,03</b>	0,78	0,67	<b>0,98</b>	0,85
<b>s</b>	0,49	2,16	9,10	153	0,69	0,76	27,54	6,73	23,68	9,32	1,83	0,65	15
<b>V</b>	0,24	4,66	83	23527	0,48	0,58	758	45,29	561	87	3,36	0,42	221
<b>Curtosis</b>	-0,84	-1,06	-1,04	-1,35	0,34	6,54	-0,15	0,74	2,08	-2,21	-0,49	-2,13	-0,23
<b>C.Asim.</b>	1,23	0,22	0,94	-0,60	0,17	2,53	0,77	1,26	-0,45	0,35	1,21	-0,07	0,81
<b>Mínimo</b>	0	4,93	2	77	1	0,18	19	2	63	0,005	0,78	2,05	8
<b>Máximo</b>	1	10,97	24	463	3	2,31	96	20	142	0,026	5,3	3,59	49
<b>N.C.(95%)</b>	0,45	2,00	8,42	142	0,64	0,71	25,47	6,22	21,90	8,62	1,70	0,60	13,75

	Mg (%)	Mn	Mo	Na(%)	Nb	Ni	P	Pb	Sb	Sc	Ti (%)	V	W	Y	Zn
<b>Media</b>	0,46	331,71	0,86	1,21	3,86	13,29	513,71	20,57	0,71	7,00	0,14	37,43	3,29	12,57	59,57
<b>p<sub>25</sub></b>	0,14	217,00	1,00	0,71	2,50	6,50	270,00	15,00	0,00	3,50	0,04	9,00	2,50	10,00	31,00
<b>p<sub>75</sub></b>	0,48	344,00	1,00	1,61	5,00	19,50	743,50	21,00	1,00	9,00	0,21	53,00	3,50	15,50	83,50
<b>Error típico</b>	0,22	71,13	0,14	0,28	0,59	4,05	104,91	3,00	0,29	1,90	0,04	15,23	0,52	1,66	11,39
<b>Mediana</b>	0,2	335	1	1,23	4	7	453	21	1	5	0,16	21	3	12	62
<b>m/x</b>	0,44	<b>1,01</b>	<b>1,17</b>	<b>1,02</b>	<b>1,04</b>	0,53	0,88	<b>1,02</b>	1,40	0,71	<b>1,12</b>	0,56	<b>0,91</b>	<b>0,95</b>	<b>1,04</b>
<b>s</b>	0,57	188	0,38	0,74	1,57	10,70	277,57	7,93	0,76	5,03	0,12	40,31	1,38	4,39	30
<b>V</b>	0,33	35420	0,14	0,54	2,48	115	77046	63	0,57	25,33	0,01	1625	1,90	19	908
<b>Curtosis</b>	4,10	3,64	7,00	-0,62	-1,68	-0,89	-1,91	3,67	-0,35	0,27	-1,01	0,56	2,32	-0,59	-2,17
<b>C.Asim.</b>	2,05	1,71	-2,65	0,19	-0,04	1,06	0,43	1,76	0,60	1,26	0,36	1,31	1,42	0,01	0,08
<b>Mínimo</b>	0,1	145	0	0,26	2	4	238	14	0	3	0,01	6	2	6	27
<b>Máximo</b>	1,67	720	1	2,35	6	30	878	37	2	16	0,33	111	6	19	99
<b>N.C.(95%)</b>	0,53	174,06	0,35	0,68	1,46	9,90	256,71	7,34	0,70	4,65	0,11	37,28	1,28	4,06	27,87

p<sub>25</sub>: percentil al 25%

p<sub>75</sub>: percentil al 75%

C. Asim: coeficiente de asimetría

V: varianza de la muestra

s: desviación estándar

NC: nivel de confianza para la media

**ANEXO VIII: ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS OBTENIDOS DE  
ÍNDICES DE ACUMULACIÓN EDÁFICA Y FACTORES DE  
ENRIQUECIMIENTO.**

ANEXO VIII: ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS OBTENIDOS DE ÍNDICES DE ACUMULACIÓN EDÁFICA

	<i>Al</i>	<i>As</i>	<i>Ba</i>	<i>Ca</i>	<i>Cd</i>	<i>Ce</i>	<i>Co</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>K</i>	<i>La</i>
Media	11.03	7.58	12.13	2.64	2.39	4.41	4.88	1.11	4.04	11.41	24.62	3.26
p25	1.70	6.00	1.53	0.47	0.76	2.22	2.00	0.39	1.38	1.59	1.59	2.00
p75	13.99	8.87	12.68	3.74	2.56	5.09	6.00	0.69	5.50	11.19	23.18	4.17
Error típico	4.61	1.33	5.86	2.18	0.80	1.39	1.43	0.59	1.38	6.85	12.29	0.76
Mediana	3.84	6.42	3.95	0.47	1.39	2.42	3.00	0.55	2.43	2.72	4.50	2.20
m/x	0.35	<b>0.85</b>	0.33	0.18	0.58	0.55	0.62	0.50	0.60	0.24	0.18	0.70
S	14.59	4.22	18.53	3.77	2.40	4.40	4.29	1.86	4.36	21.67	38.88	2.41
V	213	18	343	14	6	19	18	3	19	469	1515	6
Curtosis	2.49	1.18	4.58		0.16	4.67	0.28	9.81	4.79	8.63	2.73	2.11
C.Asim	1.73	0.97	2.15	1.73	1.30	2.11	1.31	3.12	2.09	2.88	1.86	1.56
Mínimo	0.94	2.17	0.96	0.46	0.41	0.73	1.38	0.33	0.71	0.64	0.88	0.76
Máximo	44.80	16.49	58.63	7.00	6.68	15.50	13.00	6.40	15.05	71.50	115.00	8.75
N.C.(95%)	10.43	3.02	13.25	9.37	1.85	3.15	3.30	1.33	3.12	15.50	27.81	1.72

	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>	<i>Na</i>	<i>Ni</i>	<i>P</i>	<i>Pb</i>	<i>Sc</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Y</i>	<i>Zn</i>
Media	16.28	5.12	12.30	2.11	2.98	2.51	3.92	6.08	4.46	3.54	3.14
p25	0.93	3.05	1.29	1.64	1.46	1.69	1.50	1.24	1.59	1.45	1.79
p75	6.71	7.38	16.94	2.22	4.00	3.22	5.00	5.50	5.03	5.00	4.78
Error típico	9.65	1.04	6.09	0.26	0.70	0.32	1.04	3.12	1.49	0.88	0.60
Mediana	2.05	4.35	3.13	1.92	1.79	2.72	4.00	2.17	2.87	2.00	2.81
m/x	0.13	<b>0.85</b>	0.25	<b>0.91</b>	0.60	<b>1.08</b>	<b>1.02</b>	0.36	0.64	0.56	<b>0.89</b>
S	28.94	3.29	17.22	0.79	2.11	0.89	3.13	9.36	4.70	2.63	1.71
V	837	11	297	1	4	1	10	88	22	7	3
Curtosis	3.80	-0.57	1.92	2.86	-0.09	-1.60	2.96	6.97	4.98	-0.97	-1.74
C.Asim	2.07	0.59	1.62	1.67	1.06	-0.30	1.51	2.58	2.13	0.79	0.23
Mínimo	0.59	1.11	0.62	1.33	1.14	1.24	0.85	0.86	0.67	1.00	0.96
Máximo	84.00	11.09	48.00	3.89	6.99	3.67	11.00	30.00	16.40	8.00	5.55
N.C.(95%)	22.24	2.35	14.40	0.61	1.62	0.75	2.41	7.19	3.36	2.02	1.43



ANEXO VIII: ESTADÍSTICOS OBTENIDOS DE LOS FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO

	As	Ba	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	K	La
Media	3.38	0.99	0.57	0.75	0.88	1.14	0.34	0.68	1.12	1.44	0.77
p25	0.43	0.92	0.38	0.26	0.43	0.74	0.07	0.44	0.59	0.94	0.29
p75	2.88	1.05	0.81	1.09	1.03	1.40	0.55	0.88	1.06	1.80	1.06
Error típico	1.60	0.06	0.21	0.26	0.22	0.22	0.09	0.11	0.36	0.20	0.19
Mediana	1.41	1.01	0.62	0.44	0.71	1.08	0.24	0.60	0.88	1.05	0.67
m/x	0.42	<b>1.02</b>	<b>1.09</b>	0.59	<b>0.80</b>	<b>0.94</b>	<b>0.71</b>	<b>0.88</b>	<b>0.79</b>	<b>0.73</b>	<b>0.87</b>
s	5.30	0.20	0.42	0.81	0.72	0.68	0.31	0.38	1.20	0.68	0.64
V	28.04	0.04	0.17	0.65	0.52	0.47	0.10	0.14	1.43	0.46	0.42
Curtosis	5.40	1.83	0.24	3.35	2.03	-0.39	-0.69	-0.62	9.27	-0.30	3.46
C.Asim	2.33	-0.63	-0.63	1.79	1.53	0.42	0.67	0.50	2.94	1.12	1.67
Mínimo	0.22	0.56	0.03	0.03	0.21	0.23	0.01	0.14	0.29	0.93	0.20
Máximo	17.51	1.31	1.01	2.69	2.57	2.30	0.93	1.32	4.61	2.57	2.39
N.C.(95%)	3.56	0.13	0.66	0.58	0.49	0.49	0.21	0.26	0.80	0.45	0.43

	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sc	Ti	V	Y	Zn
Media	1.48	1.26	1.98	0.82	0.89	0.89	0.87	0.80	0.73	0.86	0.88
P25	0.77	0.58	0.80	0.25	0.40	0.29	0.62	0.60	0.36	0.52	0.34
P75	1.74	1.81	2.27	1.02	1.48	1.30	1.16	0.96	0.99	1.07	1.16
Error típico	0.41	0.30	0.52	0.21	0.22	0.21	0.12	0.07	0.11	0.16	0.18
Mediana	1.12	1.00	1.41	0.77	0.56	1.06	0.93	0.73	0.89	0.88	1.00
m/x	0.76	<b>0.79</b>	0.71	<b>0.93</b>	0.62	<b>1.19</b>	<b>1.06</b>	<b>0.91</b>	<b>1.21</b>	<b>1.02</b>	<b>1.13</b>
S	1.29	0.99	1.63	0.66	0.68	0.62	0.39	0.22	0.35	0.50	0.54
V	1.66	0.97	2.66	0.43	0.46	0.38	0.15	0.05	0.12	0.25	0.29
Curtosis	4.26	-0.61	0.26	-0.14	-1.56	-1.53	-0.93	-1.18	-1.53	2.04	-1.05
C.Asim	1.86	0.74	1.21	0.71	0.57	-0.03	-0.54	0.58	-0.14	1.01	-0.08
Mínimo	0.04	0.10	0.54	0.09	0.12	0.08	0.25	0.58	0.28	0.16	0.11
Máximo	4.66	3.03	5.08	2.06	1.88	1.74	1.37	1.17	1.28	1.97	1.69
N.C.(95%)	0.92	0.66	1.17	0.47	0.49	0.48	0.28	0.16	0.24	0.36	0.41

p<sub>25</sub>: percentil al 25%

p<sub>75</sub>: percentil al 75%

C. Asim: coeficiente de asimetría

V: varianza de la muestra

s: desviación estándar

NC: nivel de confianza para la media

**ANEXO IX: COEFICIENTES DE CORRELACIÓN OBTENIDOS  
EN HORIZONTE SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL.**

ANEXO IX: COEFICIENTES DE CORRELACIÓN OBTENIDOS HORIZONTE SUPERFICIAL (IV+IG)

	Arcilla	Limo	Arena	pH	MO	CO	Al	As	Ba	Ca	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	K	La	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sc	Ti	V	Y	Zn
Arcilla	1,00																											
Limo	-0,021	1,000																										
Arena	<b>-0,449</b>	<b>-0,884</b>	1,000																									
pH	<b>0,516</b>	<b>-0,500</b>	0,207	1,000																								
MO	<b>-0,423</b>	<b>0,511</b>	-0,259	<b>-0,489</b>	1,000																							
CO	<b>-0,423</b>	<b>0,510</b>	-0,259	<b>-0,488</b>	<b>1,000</b>	1,000																						
Al	-0,126	0,204	-0,123	-0,163	0,213	0,214	1,00																					
As	0,084	0,261	-0,273	0,047	0,021	0,022	0,208	1,00																				
Ba	-0,195	0,221	-0,107	<b>-0,537</b>	-0,040	-0,041	0,132	-0,166	1,00																			
Ca	0,270	0,136	-0,249	0,401	0,082	0,083	-0,316	0,309	<b>-0,423</b>	1,00																		
Ce	-0,071	<b>0,429</b>	-0,352	<b>-0,543</b>	-0,094	-0,095	0,126	0,284	<b>0,572</b>	<b>-0,414</b>	1,00																	
Co	-0,390	<b>0,597</b>	-0,353	<b>-0,610</b>	<b>0,499</b>	<b>0,498</b>	<b>0,532</b>	0,122	<b>0,585</b>	-0,205	<b>0,497</b>	1,00																
Cr	<b>-0,487</b>	-0,294	<b>0,495</b>	-0,362	0,050	0,050	0,062	-0,301	0,131	<b>-0,577</b>	0,083	-0,002	1,00															
Cu	-0,265	0,380	-0,221	<b>-0,459</b>	<b>0,523</b>	<b>0,523</b>	0,211	0,117	-0,074	-0,045	0,306	0,410	-0,052	1,00														
Fe	-0,394	<b>0,415</b>	-0,190	<b>-0,626</b>	0,400	0,400	<b>0,652</b>	0,203	<b>0,582</b>	-0,259	<b>0,537</b>	<b>0,922</b>	0,065	<b>0,455</b>	1,00													
K	0,213	<b>-0,460</b>	0,315	<b>0,476</b>	-0,305	-0,305	0,371	-0,292	-0,166	<b>-0,414</b>	-0,351	-0,379	0,125	-0,266	-0,301	1,00												
La	-0,125	<b>0,448</b>	-0,346	<b>-0,597</b>	0,009	0,008	0,083	0,250	<b>0,604</b>	-0,351	<b>0,981</b>	<b>0,572</b>	0,050	0,376	<b>0,596</b>	<b>-0,448</b>	1,00											
Mg	0,281	0,235	-0,345	0,215	0,178	0,178	-0,012	0,133	-0,237	<b>0,822</b>	-0,243	0,075	<b>-0,536</b>	0,166	0,086	-0,376	-0,178	1,00										
Mn	-0,166	0,300	-0,191	<b>-0,480</b>	0,156	0,156	0,393	-0,098	<b>0,528</b>	-0,253	<b>0,462</b>	<b>0,555</b>	0,381	0,157	<b>0,608</b>	-0,186	<b>0,482</b>	-0,007	1,00									
Na	0,064	-0,325	0,263	0,344	-0,086	-0,085	<b>0,549</b>	-0,105	<b>-0,534</b>	-0,134	<b>-0,421</b>	-0,279	0,168	-0,003	-0,138	<b>0,699</b>	<b>-0,504</b>	-0,003	-0,065	1,00								
Ni	<b>-0,427</b>	<b>0,552</b>	-0,297	<b>-0,652</b>	<b>0,599</b>	<b>0,599</b>	0,352	0,014	<b>0,472</b>	-0,116	<b>0,418</b>	<b>0,924</b>	-0,020	<b>0,596</b>	<b>0,831</b>	-0,454	<b>0,533</b>	0,149	<b>0,419</b>	-0,300	1,00							
P	-0,264	0,108	0,026	0,063	<b>0,508</b>	<b>0,508</b>	0,216	0,013	-0,337	0,341	-0,358	0,093	-0,199	0,291	0,109	0,036	-0,277	<b>0,441</b>	-0,123	0,280	0,178	1,00						
Pb	-0,244	0,300	-0,160	-0,411	0,364	0,363	0,219	-0,081	<b>0,642</b>	-0,240	<b>0,424</b>	<b>0,711</b>	-0,043	0,349	<b>0,665</b>	-0,196	<b>0,540</b>	-0,020	0,380	<b>-0,430</b>	<b>0,706</b>	0,230	1,00					
Sc	-0,341	<b>0,454</b>	-0,250	<b>-0,616</b>	0,411	0,411	<b>0,647</b>	0,263	<b>0,577</b>	-0,217	<b>0,557</b>	<b>0,905</b>	0,038	<b>0,464</b>	<b>0,988</b>	-0,323	<b>0,614</b>	0,111	<b>0,646</b>	-0,153	<b>0,808</b>	0,097	<b>0,658</b>	1,00				
Ti	-0,261	0,355	-0,198	<b>-0,714</b>	0,096	0,095	0,048	0,031	<b>0,599</b>	-0,307	<b>0,765</b>	<b>0,548</b>	0,099	<b>0,452</b>	<b>0,593</b>	<b>-0,502</b>	<b>0,800</b>	-0,068	<b>0,540</b>	<b>-0,420</b>	<b>0,584</b>	-0,339	0,351	<b>0,600</b>	1,00			
V	-0,382	<b>0,470</b>	-0,245	<b>-0,647</b>	<b>0,449</b>	<b>0,449</b>	<b>0,538</b>	0,196	<b>0,648</b>	-0,177	<b>0,541</b>	<b>0,930</b>	0,009	<b>0,440</b>	<b>0,976</b>	-0,385	<b>0,622</b>	0,126	<b>0,602</b>	-0,268	<b>0,868</b>	0,109	<b>0,735</b>	<b>0,978</b>	<b>0,611</b>	1,00		
Y	0,115	0,171	-0,216	-0,338	-0,261	-0,262	0,124	0,240	0,218	-0,224	<b>0,537</b>	0,174	-0,029	0,148	0,255	-0,229	<b>0,499</b>	-0,068	0,131	-0,160	0,114	-0,341	-0,016	0,244	<b>0,528</b>	0,163	1,00	
Zn	-0,277	<b>0,449</b>	-0,275	-0,405	<b>0,584</b>	<b>0,583</b>	<b>0,704</b>	0,078	0,266	-0,183	0,170	<b>0,784</b>	-0,025	<b>0,463</b>	<b>0,785</b>	-0,088	0,212	0,198	0,388	0,071	<b>0,676</b>	0,325	<b>0,545</b>	<b>0,758</b>	0,264	<b>0,720</b>	<b>0,720</b>	1,00
FeO A	-0,466	0,280	-0,057	<b>-0,628</b>	<b>0,457</b>	<b>0,457</b>	<b>0,504</b>	0,289	0,247	<b>-0,445</b>	0,402	<b>0,446</b>	<b>0,528</b>	0,305	<b>0,560</b>	-0,049	0,367	-0,287	<b>0,530</b>	0,090	0,351	-0,015	0,176	<b>0,570</b>	0,408	<b>0,503</b>	0,190	<b>0,458</b>
MnO A	0,057	0,211	-0,210	-0,335	0,050	0,050	0,259	-0,221	<b>0,460</b>	-0,323	0,341	0,317	0,435	-0,036	0,330	0,011	0,329	-0,169	<b>0,940</b>	-0,077	0,167	-0,248	0,268	0,379	0,323	0,331	-0,013	0,149
FeO C	-0,414	0,375	-0,176	<b>-0,647</b>	0,206	0,206	0,325	0,293	<b>0,531</b>	-0,185	<b>0,682</b>	<b>0,764</b>	-0,026	0,433	<b>0,843</b>	-0,498	<b>0,737</b>	-0,014	0,415	-0,426	<b>0,711</b>	-0,093	<b>0,559</b>	<b>0,823</b>	<b>0,646</b>	<b>0,823</b>	0,402	0,449
MnO C	0,322	0,368	<b>-0,466</b>	-0,011	-0,025	-0,025	0,421	0,333	0,255	0,149	0,343	<b>0,476</b>	-0,323	0,132	<b>0,470</b>	-0,103	0,366	0,189	<b>0,649</b>	-0,067	0,321	-0,080	0,356	<b>0,530</b>	0,245	<b>0,475</b>	0,108	0,283

ANEXO IX: COEFICIENTES DE CORRELACIÓN OBTENIDOS EN HORIZONTE SUBSUPERFICIAL (IV+IG)

	Arc	Limo	Arena	pH	MO	CO	Al	As	Ba	Ca	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	K	La	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sc	Ti	V	Y	Zn
Arcilla	1,00																											
Limo	0,334	1,000																										
Arena	<b>-0,736</b>	<b>-0,883</b>	1,000																									
pH	0,048	<b>-0,559</b>	0,388	1,000																								
MO	-0,103	<b>0,761</b>	<b>-0,492</b>	<b>-0,452</b>	1,000																							
CO	-0,103	<b>0,761</b>	<b>-0,492</b>	<b>-0,452</b>	<b>1,000</b>	1,000																						
Al	0,313	0,138	-0,249	-0,151	0,176	0,177	1,00																					
As	-0,012	-0,209	0,147	-0,080	-0,054	-0,045	0,195	1,00																				
Ba	-0,074	0,347	-0,224	<b>-0,532</b>	0,292	0,292	-0,008	-0,044	1,00																			
Ca	0,245	0,160	-0,228	<b>0,466</b>	0,027	0,027	-0,241	0,069	-0,375	1,00																		
Ce	0,078	0,317	-0,275	<b>-0,522</b>	0,277	0,278	0,216	0,202	<b>0,641</b>	-0,326	1,00																	
Co	-0,050	<b>0,603</b>	-0,412	<b>-0,673</b>	<b>0,676</b>	<b>0,676</b>	0,355	0,144	<b>0,486</b>	-0,208	<b>0,433</b>	1,00																
Cr	-0,336	-0,413	<b>0,456</b>	-0,294	-0,295	-0,295	0,145	<b>0,498</b>	-0,070	<b>-0,498</b>	0,079	0,018	1,00															
Cu	-0,076	0,337	-0,201	-0,351	<b>0,500</b>	<b>0,500</b>	0,396	0,071	0,052	-0,124	0,274	<b>0,660</b>	-0,007	1,00														
Fe	0,031	0,382	-0,296	<b>-0,628</b>	<b>0,454</b>	<b>0,455</b>	<b>0,560</b>	0,411	<b>0,463</b>	-0,246	<b>0,573</b>	<b>0,882</b>	0,192	<b>0,683</b>	1,00													
K	-0,006	-0,367	0,277	<b>0,459</b>	-0,236	-0,235	0,387	-0,349	-0,262	-0,334	-0,307	-0,411	-0,020	-0,135	-0,386	1,00												
La	0,049	0,329	-0,270	<b>-0,530</b>	0,300	0,301	0,158	0,258	<b>0,642</b>	-0,261	<b>0,984</b>	<b>0,491</b>	0,068	0,334	<b>0,627</b>	-0,411	1,00											
Mg	0,261	0,230	-0,287	0,301	0,145	0,145	-0,051	0,090	-0,213	<b>0,826</b>	-0,158	0,075	<b>-0,422</b>	0,107	0,064	-0,367	-0,093	1,00										
Mn	-0,395	-0,014	0,201	<b>-0,487</b>	0,180	0,181	0,161	<b>0,445</b>	<b>0,438</b>	-0,224	<b>0,468</b>	0,402	<b>0,500</b>	0,221	<b>0,554</b>	-0,351	<b>0,490</b>	0,029	1,00									
Na	-0,087	<b>-0,417</b>	0,354	0,400	-0,201	-0,200	<b>0,511</b>	-0,112	<b>-0,597</b>	-0,126	<b>-0,414</b>	-0,305	0,191	0,022	-0,213	<b>0,740</b>	<b>-0,491</b>	-0,053	-0,093	1,00								
Ni	-0,101	<b>0,537</b>	-0,342	<b>-0,586</b>	<b>0,607</b>	<b>0,607</b>	0,231	0,218	0,389	-0,073	0,336	<b>0,935</b>	0,028	<b>0,731</b>	<b>0,842</b>	<b>-0,501</b>	<b>0,437</b>	0,192	0,383	-0,332	1,00							
P	-0,154	0,178	-0,038	0,266	0,319	0,319	0,164	-0,007	-0,299	<b>0,468</b>	-0,156	0,059	-0,353	0,279	0,037	0,074	-0,129	<b>0,529</b>	-0,041	0,286	0,110	1,00						
Pb	-0,147	0,388	-0,206	-0,296	<b>0,591</b>	<b>0,591</b>	-0,113	-0,188	<b>0,566</b>	-0,219	<b>0,476</b>	<b>0,509</b>	-0,327	<b>0,438</b>	0,355	-0,157	<b>0,532</b>	-0,057	0,152	<b>-0,425</b>	<b>0,481</b>	0,100	1,00					
Sc	0,100	0,396	-0,339	<b>-0,552</b>	<b>0,464</b>	<b>0,465</b>	<b>0,593</b>	<b>0,466</b>	<b>0,429</b>	-0,151	<b>0,625</b>	<b>0,826</b>	0,162	<b>0,654</b>	<b>0,974</b>	-0,368	<b>0,674</b>	0,155	<b>0,587</b>	-0,191	<b>0,785</b>	0,080	0,325	1,00				
Ti	0,033	0,353	-0,282	<b>-0,667</b>	0,227	0,227	0,178	0,231	<b>0,610</b>	-0,265	<b>0,724</b>	<b>0,612</b>	0,122	<b>0,452</b>	<b>0,717</b>	<b>-0,514</b>	<b>0,761</b>	-0,021	<b>0,549</b>	<b>-0,456</b>	<b>0,651</b>	-0,240	0,343	<b>0,694</b>	1,00			
V	-0,004	<b>0,554</b>	-0,402	<b>-0,651</b>	<b>0,640</b>	<b>0,640</b>	<b>0,421</b>	0,268	<b>0,558</b>	-0,158	<b>0,537</b>	<b>0,949</b>	0,023	<b>0,666</b>	<b>0,947</b>	<b>-0,449</b>	<b>0,604</b>	0,133	<b>0,531</b>	-0,337	<b>0,908</b>	0,085	<b>0,518</b>	<b>0,926</b>	<b>0,689</b>	1,00		
Y	0,216	-0,026	-0,092	-0,279	-0,160	-0,160	0,314	<b>0,426</b>	0,220	-0,162	<b>0,627</b>	0,168	0,210	0,138	<b>0,453</b>	-0,229	<b>0,611</b>	-0,020	0,300	-0,117	0,150	-0,095	-0,051	<b>0,466</b>	<b>0,553</b>	0,236	1,00	
Zn	0,098	<b>0,433</b>	-0,352	-0,408	<b>0,537</b>	<b>0,538</b>	<b>0,625</b>	0,174	0,088	-0,195	0,174	<b>0,710</b>	0,000	<b>0,768</b>	<b>0,725</b>	-0,033	0,182	0,081	0,210	0,085	<b>0,634</b>	0,201	0,238	<b>0,694</b>	0,361	<b>0,678</b>	0,192	1,00

**ANEXO X: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE  
SORCIÓN. MUESTRAS IV.**

ANEXO X: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE SORCIÓN. MUESTRAS IV.

VALOR ABSORBANCIA NIQUEL					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IV-1	0,402	0,208	0,349	0,222	0,440
IV-2	0,344	0,158	0,427	0,103	n.d.
IV-4	0,411	0,228	0,402	0,300	0,089
IV-6	0,400	0,216	0,380	0,210	0,064
IV-7	0,382	0,177	0,270	0,137	0,216
IV-8	0,398	0,212	0,382	0,277	0,075
IV-11	0,357	0,193	0,495	0,137	0,308
IV-13	0,272	0,085	0,154	0,028	0,065
IV-15	0,325	0,164	0,440	0,079	0,178
IV-16	0,240	0,085	0,190	0,039	0,117
IV-17	0,298	0,105	0,227	0,034	0,080
IV-20	0,306	0,119	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	0,366	0,170	0,466	0,058	0,193
IV-22	0,333	0,142	0,366	0,056	0,141
IV-23	0,304	0,105	0,229	0,033	0,068
ESTIMACIÓN LINEAL mg/L NIQUEL. MÉTODO MÍNIMOS CUADRADOS.					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IV-1	8,792	4,329	8,48	4,651	9,729
IV-2	7,458	3,178	9,367	1,913	n.d.
IV-4	8,999	4,789	9,859	6,445	1,465
IV-6	8,746	4,513	9,287	4,375	0,876
IV-7	8,332	3,615	6,425	2,695	4,455
IV-8	8,700	4,421	9,339	5,916	1,135
IV-11	7,757	3,984	10,932	2,695	6,621
IV-13	5,801	1,499	3,086	0,187	0,899
IV-15	7,020	3,316	9,666	1,361	3,560
IV-16	5,065	1,499	3,915	0,440	2,124
IV-17	6,399	1,959	4,766	0,325	1,253
IV-20	6,583	2,281	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	7,964	3,454	10,264	0,878	3,913
IV-22	7,204	2,810	7,964	0,832	2,689
IV-23	6,537	1,959	4,812	0,302	0,970

## ANEXO X: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE SORCIÓN.MUESTRAS IV.

mg/l NIQUEL x FACTOR DE DILUCIÓN					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IV-1	879,20	432,86	169,6	46,51	9,73
IV-2	745,76	317,83	93,67	19,13	n.d.
IV-4	899,90	478,88	197,18	64,45	14,65
IV-6	874,59	451,27	185,74	43,75	8,76
IV-7	833,18	361,54	128,5	26,95	4,46
IV-8	869,99	442,07	186,78	59,16	11,35
IV-11	775,66	398,35	109,32	26,95	6,62
IV-13	580,11	149,90	30,86	1,87	0,90
IV-15	702,04	331,63	96,66	13,61	3,56
IV-16	506,48	149,90	39,15	4,40	2,12
IV-17	639,92	195,89	47,66	3,25	1,25
IV-20	658,33	228,10	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	796,37	345,44	102,64	8,78	3,91
IV-22	720,45	281,02	79,64	8,32	2,69
IV-23	653,73	195,90	48,12	3,02	0,97
mg NIQUEL EN 50 ml DE SOLUCIÓN					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IV-1	43,96	21,64	8,48	2,33	0,49
IV-2	37,29	15,89	4,68	0,96	0,00
IV-4	45,00	23,94	9,86	3,22	0,73
IV-6	43,73	22,56	9,29	2,19	0,44
IV-7	41,66	18,08	6,43	1,35	0,22
IV-8	43,50	22,10	9,34	2,96	0,57
IV-11	38,78	19,92	5,47	1,35	0,33
IV-13	29,01	7,50	1,54	0,09	0,04
IV-15	35,10	16,58	4,83	0,68	0,18
IV-16	25,32	7,50	1,96	0,22	0,11
IV-17	32,00	9,79	2,38	0,16	0,06
IV-20	32,92	11,41	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	39,82	17,27	5,13	0,44	0,20
IV-22	36,02	14,05	3,98	0,42	0,13
IV-23	32,69	9,80	2,41	0,15	0,05

## ANEXO X: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE SORCIÓN. MUESTRAS IV.

mg NIQUEL SORBIDO EN 5g DE SUELO					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IV-1	6,04	3,36	4,02	2,67	2,01
IV-2	12,71	9,11	7,82	4,04	2,50
IV-4	5,00	1,06	2,64	1,78	1,77
IV-6	6,27	2,44	3,21	2,81	2,06
IV-7	8,34	6,92	6,08	3,65	2,28
IV-8	6,50	2,90	3,16	2,04	1,93
IV-11	11,22	5,08	7,03	3,65	2,17
IV-13	20,99	17,51	10,96	4,91	2,46
IV-15	14,90	8,42	7,67	4,32	2,32
IV-16	24,68	17,51	10,54	4,78	2,39
IV-17	18,00	15,21	10,12	4,84	2,44
IV-20	17,08	13,59	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	10,18	7,73	7,37	4,56	2,30
IV-22	13,98	10,95	8,52	4,58	2,37
IV-23	17,31	15,21	10,09	4,85	2,45
mg Ni SORBIDO/kg DE SUELO					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IV-1	1208	671	804	535	403
IV-2	2542	1822	1563	993	500
IV-4	1001	211	528	355	354
IV-6	1254	487	643	563	412
IV-7	1668	1385	1215	730	455
IV-8	1300	579	632	408	387
IV-11	2243	1016	1407	730	434
IV-13	4199	3501	2191	981	491
IV-15	2980	1684	1533	864	464
IV-16	4935	3501	2109	956	479
IV-17	3601	3157	2023	967	487
IV-20	3417	2797	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	2036	1546	1474	912	461
IV-22	2796	2190	1704	917	473
IV-23	3463	3041	2019	970	490



ANEXO X: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE SORCIÓN. MUESTRAS IV.

% SORCIÓN					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IV-1	12	13	32	53	81
IV-2	25	36	63	99	100
IV-4	10	4	21	36	71
IV-6	13	10	26	56	82
IV-7	17	28	49	73	91
IV-8	13	12	25	41	77
IV-11	22	20	56	73	87
IV-13	42	70	88	98	98
IV-15	30	34	61	86	93
IV-16	49	70	84	96	96
IV-17	36	63	81	97	97
IV-20	34	56	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	20	31	59	91	92
IV-22	28	44	68	92	95
IV-23	35	61	81	97	98

**ANEXO XI: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE  
SORCIÓN. MUESTRAS IG.**

ANEXO XI: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE SORCIÓN. MUESTRAS IG.

VALOR ABSORBANCIA NIQUEL					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IG-1	0,373	0,179	0,315	0,169	0,260
IG-2	0,385	0,189	0,337	0,165	0,074
IG-3	0,368	0,170	0,297	0,106	0,05
IG-4	0,346	0,145	0,413	0,084	0,084
IG-5	0,252	0,348	0,174	0,027	0,054
IG-6	0,276	0,403	0,229	0,024	0,024
IG-7	0,360	0,159	0,454	0,082	0,083
ESTIMACIÓN LINEAL mg/L NIQUEL. MÉTODO MÍNIMOS CUADRADOS					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IG-1	8,152	3,584	7,596	3,431	5,525
IG-2	8,434	3,819	8,168	3,339	1,373
IG-3	8,034	3,372	7,127	1,982	0,770
IG-4	7,516	2,783	9,093	1,476	1,624
IG-5	5,303	8,454	3,466	0,164	0,870
IG-6	5,868	9,885	4,761	0,095	0,116
IG-7	7,846	3,421	10,059	1,430	1,599
mg/l NIQUEL x FACTOR DE DILUCIÓN					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IG-1	815,17	358,37	75,96	34,31	5,52
IG-2	843,42	381,91	81,68	33,39	1,37
IG-3	803,39	337,18	71,27	19,82	0,77
IG-4	751,59	278,31	90,93	14,76	1,62
IG-5	530,26	84,54	34,66	1,64	0,87
IG-6	586,77	98,85	47,61	0,95	0,12
IG-7	784,55	342,09	100,59	14,30	1,60

mg NIQUEL EN 50 ml DE SOLUCIÓN					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IG-1	40,76	17,92	3,80	1,72	0,28
IG-2	42,17	19,10	4,08	1,67	0,07
IG-3	40,17	16,86	3,56	0,99	0,04
IG-4	37,58	13,92	4,55	0,74	0,08
IG-5	26,51	4,23	1,73	0,08	0,04
IG-6	29,34	4,94	2,38	0,05	0,006
IG-7	39,23	17,10	5,03	0,71	0,08
mg NIQUEL SORBIDO EN 5g DE SUELO					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IG-1	9,24	7,08	8,70	3,28	2,22
IG-2	7,83	5,90	8,42	3,33	2,43
IG-3	9,83	8,14	8,94	4,01	2,46
IG-4	12,42	11,08	7,95	4,26	2,42
IG-5	23,49	20,77	10,77	4,92	2,46
IG-6	20,66	20,06	10,12	4,95	2,49
IG-7	10,77	7,90	7,47	4,29	2,42
mg NIQUEL SORBIDO/kg SUELO					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IG-1	1848	1416	1740	657	445
IG-2	1566	1181	1683	666	486
IG-3	1966	1628	1787	802	492
IG-4	2484	2217	1591	852	484
IG-5	4697	4155	2153	984	491
IG-6	4132	4012	2024	990	499
IG-7	2154	1579	1494	857	484

---

ANEXO XI: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE SORCIÓN. MUESTRAS IG.

---

% SORCIÓN					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IG-1	18	28	70	66	89
IG-2	16	24	67	67	97
IG-3	20	33	71	80	98
IG-4	25	44	64	85	97
IG-5	47	83	86	98	98
IG-6	41	80	81	99	100
IG-7	22	32	60	86	97

**ANEXO XII: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE  
DESORCIÓN. MUESTRAS IV.**

VALOR ABSROBANCIA NIQUEL					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IV-1	0,191	0,145	0,110	0,061	0,260
IV-2	0,402	0,312	0,245	0,120	n.d.
IV-4	0,136	0,109	0,099	0,063	0,342
IV-6	0,205	0,163	0,146	0,106	0,458
IV-7	0,355	0,271	0,229	0,112	0,436
IV-8	0,227	0,155	0,127	0,080	0,382
IV-11	0,286	0,199	0,168	0,079	0,320
IV-13	0,343	0,473	0,300	0,099	0,345
IV-15	0,416	0,328	0,263	0,127	0,069
IV-16	0,399	0,296	0,334	0,107	0,356
IV-17	0,310	0,484	0,328	0,124	0,458
IV-20	0,305	0,484	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	0,399	0,348	0,283	0,152	0,079
IV-22	0,424	0,361	0,270	0,081	0,401
IV-23	0,294	0,406	0,256	0,096	0,276
ESTIMACIÓN LINEAL mg/l NIQUEL. MÉTODO MÍNIMOS CUADRADOS					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IV-1	3,938	2,879	2,074	0,947	5,491
IV-2	8,792	6,721	5,180	2,304	n.d.
IV-4	2,672	2,051	1,821	0,993	7,422
IV-6	4,260	3,293	2,902	1,982	10,153
IV-7	7,711	5,778	4,812	2,120	9,635
IV-8	4,766	3,109	2,465	1,384	8,364
IV-11	6,123	4,122	3,408	1,361	6,904
IV-13	8,324	10,425	6,445	1,821	7,492
IV-15	9,114	7,089	5,594	2,465	1,195
IV-16	9,781	7,101	7,227	2,005	7,751
IV-17	7,466	10,679	7,089	2,396	10,153
IV-20	7,335	10,679	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	8,723	7,550	6,054	3,040	1,229
IV-22	9,298	7,849	5,755	1,407	8,811
IV-23	7,049	8,884	5,433	1,752	5,868

## ANEXO XII: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE DESORCIÓN. MUESTRAS IV.

mg/l Ni DESORBIDO x FACTOR DE DILUCIÓN					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IV-1	39,38	28,79	20,74	9,47	5,49
IV-2	87,92	67,21	51,80	23,04	n.d.
IV-4	26,72	20,51	18,21	9,93	7,42
IV-6	42,60	32,93	29,02	19,82	10,15
IV-7	77,11	57,78	48,12	21,20	9,64
IV-8	47,66	31,09	24,65	13,84	8,36
IV-11	61,23	41,22	34,08	13,61	6,90
IV-13	83,24	104,25	64,45	18,21	7,49
IV-15	91,14	70,89	55,94	24,65	11,95
IV-16	97,81	71,01	72,27	20,05	7,75
IV-17	74,66	106,79	70,89	23,96	10,15
IV-20	73,35	106,79	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	87,23	75,50	60,54	30,40	12,3
IV-22	92,98	78,49	57,55	14,07	8,81
IV-23	70,49	88,84	54,33	17,52	5,87
mg Ni DESORBIDO EN 100 ml SOLUCIÓN					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IV-1	3,94	2,88	2,07	0,95	0,55
IV-2	8,79	6,72	5,18	2,30	n.d.
IV-4	2,67	2,05	1,82	0,99	0,74
IV-6	4,26	3,29	2,90	1,98	1,02
IV-7	7,71	5,78	4,81	2,12	0,96
IV-8	4,77	3,11	2,47	1,38	0,84
IV-11	6,12	4,12	3,41	1,36	0,69
IV-13	8,32	10,43	6,45	1,82	0,75
IV-15	9,11	7,09	5,59	2,47	1,20
IV-16	9,78	7,10	7,23	2,00	0,78
IV-17	7,47	10,68	7,09	2,40	1,02
IV-20	7,34	10,68	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	8,72	7,55	6,05	3,04	1,23
IV-22	9,30	7,85	5,76	1,41	0,88
IV-23	7,05	8,88	5,43	1,75	0,59



## ANEXO XII: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE DESORCIÓN. MUESTRAS IV.

mg Ni DESORBIDO/kg DE SUELO					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IV-1	788	576	415	189	110
IV-2	1758	1344	1036	461	n.d.
IV-4	534	410	364	199	148
IV-6	852	659	580	396	203
IV-7	1542	1156	962	424	193
IV-8	953	622	493	277	167
IV-11	1225	824	682	272	138
IV-13	1665	2085	1289	364	150
IV-15	1823	1418	1119	493	239
IV-16	1956	1420	1445	401	155
IV-17	1493	2136	1418	479	203
IV-20	1467	2136	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	1745	1510	1211	608	246
IV-22	1860	1570	1151	281	176
IV-23	1410	1777	1087	350	117
% DESORCIÓN					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IV-1	65	86	52	35	27
IV-2	69	74	66	46	n.d.
IV-4	53		69	56	42
IV-6	68		48	70	49
IV-7	92	83	65	58	42
IV-8	73		54	68	43
IV-11	55	81	48	37	32
IV-13	40	56	59	37	31
IV-15	61	84	73	57	48/52
IV-16	40	42	69	42	32
IV-17	41	68	70	50	42
IV-20	43	76	n.d.	n.d.	n.d.
IV-21	86	98	82	67	53
IV-22	67	72	68	31	37
IV-23	41	58	54	36	24

**ANEXO XIII: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE  
DESORCIÓN. MUESTRAS IG.**

VALOR ABSORBANCIA NIQUEL					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IG-1	0,293	0,272	0,190	0,109	0,490
IG-2	0,238	0,180	0,146	0,082	0,17
IG-3	0,375	0,302	0,210	0,128	0,219
IG-4	0,474	0,365	0,288	0,135	0,224
IG-5	0,366	0,460	0,279	0,094	0,092
IG-6	0,359	0,486	0,316	0,120	0,177
IG-7	0,461	0,374	0,296	0,162	0,287
ESTIMACIÓN LINEAL mg/L NIQUEL. MÉTODO MÍNIMOS CUADRADOS					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IG-1	6,284	5,801	3,915	2,051	10,817
IG-2	5,019	3,684	2,902	1,430	3,786
IG-3	8,171	6,491	4,375	2,488	5,017
IG-4	10,448	7,941	6,169	2,649	5,143
IG-5	8,923	10,126	5,962	1,706	1,825
IG-6	8,741	10,725	6,813	2,304	3,962
IG-7	10,149	8,148	6,353	3,270	6,726
mg/l NIQUEL x FACTOR DE DILUCIÓN					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IG-1	62,84	58,01	39,15	20,51	10,03
IG-2	50,19	36,84	29,02	14,30	3,774
IG-3	81,71	64,91	43,75	24,88	5,019
IG-4	104,48	79,41	61,69	26,49	5,146
IG-5	178,46	101,26	59,62	17,06	1,791
IG-6	174,82	107,25	68,13	23,04	3,952
IG-7	101,49	81,48	63,53	32,70	6,748

mg Ni DESORBIDO EN 100 ml SOLUCIÓN					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IG-1	6,28	5,80	3,91	2,05	1,00
IG-2	5,02	3,68	2,90	1,43	0,38
IG-3	8,17	6,49	4,37	2,49	0,50
IG-4	10,45	7,94	6,17	2,65	0,51
IG-5	17,85	10,13	5,96	1,71	0,18
IG-6	17,48	10,72	6,81	2,30	0,40
IG-7	10,15	8,15	6,35	3,27	0,67
mg Ni DESORBIDO/kg SUELO					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IG-1	1257	1160	783	410	201
IG-2	1004	737	580	286	75
IG-3	1634	1298	875	498	100
IG-4	2090	1588	1234	530	103
IG-5	3569	2025	1192	341	36
IG-6	3496	2145	1363	461	79
IG-7	2030	1630	1271	654	135
% DESORCIÓN					
Concentraciones de (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ni aportadas (mg/kg)					
	10000	5000	2500	1000	500
IG-1	68	82	62	62	45
IG-2	64	62	51	43	16
IG-3	83	80	65	62	20
IG-4	84	72	78	62	21
IG-5	76	49	55	35	7
IG-6	85	53	67	47	16
IG-7	94	103	85	76	28

**ANEXO XIV: BALANCES IÓNICOS DE LAS MUESTRAS DE  
AGUA. PRIMER MUESTREO.**

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IV-3 PRIMER MUESTREO
---------	----------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
<b>Na<sup>+</sup></b>	0,76	0,03	<b>31,22</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	1,39	0,03	<b>31,30</b>
<b>K<sup>+</sup></b>	0,24	0,01	5,80	<b>Cl<sup>-</sup></b>	0,96	0,03	<b>29,23</b>
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0,64	0,03	<b>30,24</b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	1,68	0,04	<b>39,47</b>
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0,25	0,02	19,43	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0	0,00	0,00
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	0,12	0,01	6,30	<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	0	0,00	0,00
<b>Cu<sup>2+</sup></b>	<0,05	0,00	0,00	<b>F<sup>-</sup></b>	<0,1	0,00	0,00
<b>Zn<sup>2+</sup></b>	<0,05	0,00	0,00	<b>HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<0,2	0,00	0,00
<b>Li<sup>+</sup></b>	<0,05	0,00	0,00	<b>BrO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<0,01	0,00	0,00
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	0,138	0,007	7,01	<b>Br<sup>-</sup></b>	<0,02	0,00	0,00
<b>Mn<sup>2+</sup></b>	<0,01	0,00	0,00	<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	0,11	100,00		Suma...	0,09	100,00

<b>pH</b>	8
<b>Conductividad</b>	22
<b>DBO</b>	1,6

<b>Error %</b>	13,42
----------------	-------

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IV-5 PRIMER MUESTREO
---------	----------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	1,54	0,07	35,24	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,41	0,03	17,37
K <sup>+</sup>	0,4	0,01	5,38	Cl <sup>-</sup>	0,97	0,03	16,16
Ca <sup>2+</sup>	1,38	0,07	36,31	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,4	0,03	18,00
Mg <sup>2+</sup>	0,48	0,04	20,77	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5	0,08	48,47
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0,00	0,00
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	0,16	0,00	0,00
Zn <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,081	0,004	2,29	Br <sup>-</sup>	<0,02	0,00	0,00
Mn <sup>2+</sup>	<0,01	0,00	0,00	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	0,19	100,00		Suma...	0,17	100,00

pH	8
Conductividad	19
DQO	1,2

Error %	11,65
---------	-------

**COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO**

MUESTRA	IV-9 PRIMER MUESTREO
---------	----------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
<b>Na<sup>+</sup></b>	9,81	0,43	<b>54,15</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	1,36	0,03	4,14
<b>K<sup>+</sup></b>	0,77	0,02	2,50	<b>Cl<sup>-</sup></b>	23,28	0,66	<b>95,86</b>
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	5,08	0,25	<b>32,25</b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<0,2	0,00	0,00
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	1,04	0,09	10,86	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0	0,00	0,00
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<0,05	0,00	0,00	<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	0	0,00	0,00
<b>Cu<sup>2+</sup></b>	<0,05	0,00	0,00	<b>F<sup>-</sup></b>	<0,1	0,00	0,00
<b>Zn<sup>2+</sup></b>	<0,05	0,00	0,00	<b>HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<0,2	0,00	0,00
<b>Li<sup>+</sup></b>	<0,05	0,00	0,00	<b>BrO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<0,01	0,00	0,00
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	0,035	0,002	0,24	<b>Br<sup>-</sup></b>	<0,2	0,0000	0,00
<b>Mn<sup>2+</sup></b>	<0,01	0,000	0,00	<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	0,79	100,00		Suma...	0,68	100,00

<b>pH</b>	7,7
<b>Conductividad</b>	85
<b>DQO</b>	1,0

<b>Error %</b>	14,07
----------------	-------



## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IV-10 PRIMER MUESTREO
---------	-----------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	2,68	0,12	9,17	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,26	0,03	2,07
K <sup>+</sup>	0,72	0,02	1,45	Cl <sup>-</sup>	4,83	0,14	10,72
Ca <sup>2+</sup>	20,15	1,01	<b>79,30</b>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,32	0,01	0,55
Mg <sup>2+</sup>	1,52	0,13	9,84	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	61	1,00	<b>78,79</b>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	3	0,10	<b>7,88</b>
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
Zn <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,056	0,003	0,24	Br <sup>-</sup>	<0,02	0,0000	0,00
Mn <sup>2+</sup>	<0,01	0,000	0,00	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	1,27	100,00		Suma...	1,27	100,00

Ph	8,4
Conductividad	52
DQO	1,6

Error %	0,09
---------	------

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IV-12 PRIMER MUESTREO
---------	-----------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	1,21	0,05	3,72	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,42	0,05	3,28
K <sup>+</sup>	0,41	0,01	0,74	Cl <sup>-</sup>	0,94	0,03	1,72
Ca <sup>2+</sup>	24,54	1,23	<b>86,81</b>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Mg <sup>2+</sup>	1,46	0,12	8,49	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	77	1,26	<b>82,01</b>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	6	0,20	<b>12,99</b>
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
Zn <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,062	0,003	0,24	Br <sup>-</sup>	<0,02	0,0000	0,00
Mn <sup>2+</sup>	<0,01	0,000	0,00	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	1,41	100,00		Suma...	1,54	100,00

pH	9
Conductividad	40
DQO	1,2

Error %	-8,51
---------	-------

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IV-14 PRIMER MUESTREO
---------	-----------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	4,85	0,21	4,52	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	150,25	3,13	<b>70,14</b>
K <sup>+</sup>	0,77	0,02	0,42	Cl <sup>-</sup>	5,7	0,16	3,60
Ca <sup>2+</sup>	62,22	3,11	<b>66,73</b>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,14	0,02	0,56
Mg <sup>2+</sup>	16,06	1,32	<b>28,33</b>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	70	1,15	<b>25,71</b>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0,00	0,00
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	0,23	0,00	0,00
Zn <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,116	0,006	0,13	Br <sup>-</sup>	<0,02	0,00	0,00
Mn <sup>2+</sup>	0,033	0,001	0,03	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	4,66	100,16		Suma...	4,46	100,00

pH	7,8
Conductividad	508
DQO	1,3

Error %	4,37
---------	------

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IV-18 PRIMER MUESTREO
---------	-----------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	4,69	0,20	4,68	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	171,28	3,57	<b>71,86</b>
K <sup>+</sup>	0,75	0,02	0,44	Cl <sup>-</sup>	8,02	0,23	4,55
Ca <sup>2+</sup>	60,13	3,01	<b>68,94</b>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,85	0,04	0,81
Mg <sup>2+</sup>	13,76	1,13	<b>25,95</b>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	69	1,13	<b>22,78</b>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0,00	0,00
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	0,23	0,00	0,00
Zn <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,094	0,005	0,12	Br <sup>-</sup>	<0,02	0,00	0,00
Mn <sup>2+</sup>	0,024	0,001	0,02	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	4,36	100,14		Suma...	4,97	100,00

pH	7,9
Conductividad	590
DQO	1,2

Error %	-12,96
---------	--------

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IG-1 PRIMER MUESTREO
---------	----------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	4,91	0,21	32,54	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7,21	0,15	26,24
K <sup>+</sup>	0,17	0,00	0,66	Cl <sup>-</sup>	11,5	0,32	56,58
Ca <sup>2+</sup>	6,38	0,32	48,62	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Mg <sup>2+</sup>	1,45	0,12	18,18	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6	0,10	17,18
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0,00	0,00
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	0,11	0,01	1,01
Zn <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	<0,02	0,000	0,00	Br <sup>-</sup>	0,022	0,00	0,05
Mn <sup>2+</sup>	<0,01	0,000	0,00	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	0,66	100,00		Suma...	0,57	101,06

pH	7,5
Conductividad	66
DQO	3,0

Error %	13,60
---------	-------

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IG-2 PRIMER MUESTREO
---------	----------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	16,92	0,74	18,89	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	52	1,08	<b>30,25</b>
K <sup>+</sup>	5,23	0,13	3,43	Cl <sup>-</sup>	18,53	0,52	14,58
Ca <sup>2+</sup>	45,04	2,25	<b>57,81</b>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10,95	0,24	6,65
Mg <sup>2+</sup>	9,41	0,77	<b>19,87</b>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	106	1,74	<b>48,52</b>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0,00	0,00
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	0,22	0,01	0,31
Zn <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,88	0,03	0,77
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,094	0,005	0,13	Br <sup>-</sup>	<0,02	0,00	0,00
Mn <sup>2+</sup>	<0,01	0,000	0,00	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	3,90	100,13		Suma...	3,58	101,08

pH	7,3
Conductividad	333
DQO	6,6

Error %	8,41
---------	------

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

<b>MUESTRA</b>	<b>IG-3 PRIMER MUESTREO</b>
----------------	-----------------------------

<b>CATIONES</b>	<b>mg/l</b>	<b>meq/l</b>	<b>%meq/l</b>	<b>ANIONES</b>	<b>mg/l</b>	<b>meq/l</b>	<b>%meq/l</b>
<b>Na<sup>+</sup></b>	10,88	0,47	<b>27,95</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	15,73	0,33	<b>21,93</b>
<b>K<sup>+</sup></b>	3,92	0,10	5,92	<b>Cl<sup>-</sup></b>	12,92	0,36	<b>24,35</b>
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	16,02	0,80	<b>47,32</b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	7,52	0,16	10,94
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	3,87	0,32	18,80	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	39	0,64	<b>42,78</b>
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<0,05	0,00	0,00	<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	0	0,00	0,00
<b>Cu<sup>2+</sup></b>	<0,05	0,00	0,00	<b>F<sup>-</sup></b>	0,41	0,02	1,37
<b>Zn<sup>2+</sup></b>	<0,05	0,00	0,00	<b>HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	1,05	0,03	2,20
<b>Li<sup>+</sup></b>	<0,05	0,00	0,00	<b>BrO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<0,01	0,00	0,00
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	0,128	0,007	0,41	<b>Br<sup>-</sup></b>	<0,02	0,00	0,00
<b>Mn<sup>2+</sup></b>	<0,01	0,000	0,00	<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	1,69	100,41		Suma...	1,49	103,57

<b>pH</b>	7,3
<b>Conductividad</b>	154
<b>DQO</b>	7,4

<b>Error %</b>	12,43
----------------	-------

**ANEXO XV: BALANCES IÓNICOS DE LAS MUESTRAS DE  
AGUA. SEGUNDO MUESTREO.**



## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IV-3 SEGUNDO MUESTREO
---------	-----------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	2,14	0,09	30,48	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,75	0,04	10,29
K <sup>+</sup>	0,82	0,02	6,87	Cl <sup>-</sup>	0,98	0,03	7,79
Ca <sup>2+</sup>	2,4	0,12	39,31	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,29	0,03	7,91
Mg <sup>2+</sup>	0,81	0,07	21,82	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	16	0,26	74,01
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0,00	0,00
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
Zn <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,087	0,005	1,53	Br <sup>-</sup>	<0,02	0,00	0,00
Mn <sup>2+</sup>	<0,01	0,00	0,00	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	0,31	100,00		Suma...	0,35	100,00

pH	7,37
Conductividad	29
DQO	2,2

Error %

-14,88

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IV-5 SEGUNDO MUESTREO
---------	-----------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	2,2	0,10	6,53	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,1	0,04	3,39
K <sup>+</sup>	1,02	0,03	1,78	Cl <sup>-</sup>	1,33	0,04	2,90
Ca <sup>2+</sup>	24,9	1,25	84,95	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,55	0,01	0,93
Mg <sup>2+</sup>	1,05	0,09	5,89	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	73	1,20	92,78
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0,00	0,00
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
Zn <sup>2+</sup>	0,11	0,00	0,23	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,168	0,009	0,62	Br <sup>-</sup>	<0,02	0,00	0,00
Mn <sup>2+</sup>	<0,01	0,00	0,00	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	1,47	100,00		Suma...	1,29	100,00

pH	7,65
Conductividad	46
DQO	2,5

Error %	12,75
---------	-------

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IVG-1 SEGUNDO MUESTREO
---------	------------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	1,86	0,08	5,86	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,73	0,04	3,01
K <sup>+</sup>	0	0,00	0,00	Cl <sup>-</sup>	1,67	0,05	3,93
Ca <sup>2+</sup>	22,13	1,11	80,20	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,45	0,01	0,82
Mg <sup>2+</sup>	0,99	0,08	5,90	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	67	1,10	91,76
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0,00	0,00
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	0,102	0,01	0,45
Zn <sup>2+</sup>	0,15	0,00	0,33	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	1,9	0,102	7,40	Br <sup>-</sup>	0,031	0,0004	0,03
Mn <sup>2+</sup>	0,114	0,004	0,30	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	1,38	100,00		Suma...	1,20	100,00

pH	7,25
Conductividad	55
DQO	2,0

Error %	14,18
---------	-------

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IV-10 SEGUNDO MUESTREO
---------	------------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	2,24	0,10	5,22	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,19	0,05	2,81
K <sup>+</sup>	1,19	0,03	1,63	Cl <sup>-</sup>	2,91	0,08	5,05
Ca <sup>2+</sup>	32,86	1,64	88,13	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,71	0,04	2,29
Mg <sup>2+</sup>	1,06	0,09	4,68	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	89	1,46	89,85
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0,00	0,00
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
Zn <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,118	0,006	0,34	Br <sup>-</sup>	<0,02	0,0000	0,00
Mn <sup>2+</sup>	<0,01	0,000	0,00	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	1,86	100,00		Suma...	1,62	100,00

pH	7,34
Conductividad	48
DQO	2,2

Error %	13,79
---------	-------

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IV-12 SEGUNDO MUESTREO
---------	------------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	1,23	0,05	2,62	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,42	0,05	2,79
K <sup>+</sup>	0,41	0,01	0,51	Cl <sup>-</sup>	1,36	0,04	2,12
Ca <sup>2+</sup>	36,8	1,84	90,08	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Mg <sup>2+</sup>	1,65	0,14	6,64	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	105	1,72	95,10
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0,00	0,00
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
Zn <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,055	0,003	0,14	Br <sup>-</sup>	<0,02	0,0000	0,00
Mn <sup>2+</sup>	<0,01	0,000	0,00	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	2,04	100,00		Suma...	1,81	100,00

pH	7,41
Conductividad	51
DQO	1,3

Error %	12,07
---------	-------

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IV-14 SEGUNDO MUESTREO
---------	------------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	5,53	0,24	5,22	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	100,22	2,09	<b>47,89</b>
K <sup>+</sup>	1,05	0,03	0,58	Cl <sup>-</sup>	7,86	0,22	5,08
Ca <sup>2+</sup>	66,77	3,34	<b>72,52</b>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,3	0,05	1,15
Mg <sup>2+</sup>	12,08	0,99	<b>21,58</b>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	122	2,00	<b>45,88</b>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0,00	0,00
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
Zn <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,078	0,004	0,09	Br <sup>-</sup>	0,021	0,00	0,01
Mn <sup>2+</sup>	<0,01	0,000	0,00	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	4,60	100,00		Suma...	4,36	100,00

pH	7,42
Conductividad	377
DQO	1,7

Error %	5,44
---------	------

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IV-18 SEGUNDO MUESTREO
---------	------------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	6,41	0,28	4,93	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	131,45	2,74	51,46
K <sup>+</sup>	1,08	0,03	0,49	Cl <sup>-</sup>	7,55	0,21	4,00
Ca <sup>2+</sup>	82,99	4,15	73,34	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,72	0,06	1,11
Mg <sup>2+</sup>	14,57	1,20	21,18	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	141	2,31	43,43
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0,00	0,00
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
Zn <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,078	0,004	0,07	Br <sup>-</sup>	0,029	0,00	0,01
Mn <sup>2+</sup>	<0,01	0,000	0,00	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	5,66	100,00		Suma...	5,32	100,00

pH	7,47
Conductividad	446
DQO	2,0

Error %	6,12
---------	------

## COMPOSICIÓN QUÍMICA CUANTITATIVA- BALANCE IÓNICO

MUESTRA	IG-2 SEGUNDO MUESTREO
---------	-----------------------

CATIONES	mg/l	meq/l	%meq/l	ANIONES	mg/l	meq/l	%meq/l
Na <sup>+</sup>	15,44	0,67	16,45	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	37,85	0,79	21,23
K <sup>+</sup>	2,02	0,05	1,27	Cl <sup>-</sup>	16,56	0,47	12,56
Ca <sup>2+</sup>	49,8	2,49	61,02	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,63	0,04	0,95
Mg <sup>2+</sup>	10,53	0,87	21,22	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	147	2,41	64,88
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0,00	0,00
Cu <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	F <sup>-</sup>	0,26	0,01	0,37
Zn <sup>2+</sup>	<0,05	0,00	0,00	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<0,2	0,00	0,00
Li <sup>+</sup>	<0,05	0,00	0,00	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0,01	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,035	0,002	0,05	Br <sup>-</sup>	0,02	0,00	0,01
Mn <sup>2+</sup>	<0,01	0,000	0,00	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,1	0,00	0,00
	Suma...	4,08	100,00		Suma...	3,71	100,00

pH	7,6
Conductividad	325
DQO	2,0

Error %	9,40
---------	------



**ANEXO XVI: MATRICES DE CORRELACIÓN DE ELEMENTOS  
MAYORITARIOS Y DE RELACIONES IÓNICAS EN AGUAS.  
PRIMER Y SEGUNDO MUESTREO**



ANEXO XVI: MATRICES DE CORRELACIÓN DE ELEMENTOS MAYORITARIOS Y DE RELACIONES IÓNICAS EN AGUAS. PRIMER MUESTREO.

	<i>pH</i>	<i>CE</i>	<i>Cl</i>	<i>NO<sub>3</sub></i>	<i>SO<sub>4</sub></i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>HCO<sub>3</sub></i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Fe</i>	<i>rCl/SO<sub>4</sub></i>	<i>rNa/Cl</i>	<i>rNa/K</i>	<i>rCa/Mg</i>	<i>rCa/SO<sub>4</sub></i>
<b>pH</b>	1																
<b>CE</b>	-0,296	1,000															
<b>Cl</b>	<b>-0,671</b>	0,167	1,000														
<b>NO<sub>3</sub></b>	<b>-0,607</b>	0,261	0,430	1,000													
<b>SO<sub>4</sub></b>	-0,168	<b>0,975</b>	-0,005	0,071	1,000												
<b>SiO<sub>2</sub></b>	-0,461	0,262	0,121	<b>0,854</b>	0,128	1,000											
<b>HCO<sub>3</sub></b>	0,132	0,587	0,025	0,473	0,496	0,530	1,000										
<b>Na</b>	<b>-0,728</b>	0,306	<b>0,857</b>	<b>0,818</b>	0,093	0,571	0,362	1,000									
<b>K</b>	-0,587	0,245	0,534	<b>0,976</b>	0,041	<b>0,843</b>	0,514	<b>0,882</b>	1,000								
<b>Ca</b>	-0,061	<b>0,936</b>	0,046	0,253	<b>0,907</b>	0,329	<b>0,807</b>	0,254	0,265	1,000							
<b>Mg</b>	-0,269	<b>0,980</b>	0,108	0,270	<b>0,959</b>	0,336	<b>0,634</b>	0,291	0,259	<b>0,957</b>	1,000						
<b>Fe</b>	-0,183	0,342	-0,303	0,453	0,339	0,564	0,191	0,045	0,344	0,289	0,377	1,000					
<b>rCl/SO<sub>4</sub></b>	-0,083	-0,268	<b>0,632</b>	-0,276	-0,307	-0,552	-0,416	0,223	-0,149	-0,358	-0,327	-0,509	1,000				
<b>rNa/Cl</b>	0,357	-0,197	-0,544	0,122	-0,156	0,187	0,118	-0,247	0,045	-0,082	-0,122	0,293	-0,448	1,000			
<b>rNa/K</b>	-0,311	-0,126	0,337	-0,343	-0,106	-0,345	-0,435	0,008	-0,317	-0,245	-0,157	<b>-0,678</b>	0,259	-0,531	1,000		
<b>rCa/Mg</b>	<b>0,798</b>	-0,286	-0,283	-0,277	-0,268	-0,130	0,423	-0,285	-0,168	0,027	-0,250	-0,376	-0,006	0,127	-0,204	1,000	
<b>rCa/SO<sub>4</sub></b>	<b>0,701</b>	-0,393	-0,231	-0,342	-0,372	-0,222	0,240	-0,304	-0,219	-0,126	-0,364	-0,406	0,174	-0,043	-0,203	<b>0,889</b>	1,000

Los valores en negrita son significativamente diferentes de 0 con un nivel de significación alfa = 0,05

ANEXO XVI: MATRICES DE CORRELACIÓN DE ELEMENTOS MAYORITARIOS Y DE RELACIONES IÓNICAS EN AGUAS. SEGUNDO MUESTREO

	<i>pH</i>	<i>CE</i>	<i>Cl</i>	<i>NO<sub>3</sub></i>	<i>SO<sub>4</sub></i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>HCO<sub>3</sub></i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Fe</i>	<i>rCl/SO<sub>4</sub></i>	<i>rNa/Cl</i>	<i>rNa/K</i>	<i>rCa/Mg</i>	<i>rCa/SO<sub>4</sub></i>
<b>pH</b>	1																
<b>CE</b>	0,306	1,000															
<b>Cl</b>	0,463	<b>0,767</b>	1,000														
<b>NO<sub>3</sub></b>	0,086	<b>0,818</b>	0,552	1,000													
<b>SO<sub>4</sub></b>	0,166	<b>0,943</b>	0,514	<b>0,843</b>	1,000												
<b>SiO<sub>2</sub></b>	-0,184	<b>-0,697</b>	-0,543	-0,367	<b>-0,629</b>	1,000											
<b>HCO<sub>3</sub></b>	0,390	<b>0,797</b>	<b>0,765</b>	0,497	<b>0,663</b>	<b>-0,869</b>	1,000										
<b>Na</b>	0,521	<b>0,681</b>	<b>0,983</b>	0,463	0,407	-0,421	<b>0,676</b>	1,000									
<b>K</b>	<b>0,674</b>	0,512	<b>0,795</b>	0,556	0,304	-0,193	0,517	<b>0,811</b>	1,000								
<b>Ca</b>	0,250	<b>0,915</b>	<b>0,602</b>	<b>0,722</b>	<b>0,912</b>	<b>-0,834</b>	<b>0,894</b>	0,482	0,370	1,000							
<b>Mg</b>	0,318	<b>0,999</b>	<b>0,768</b>	<b>0,816</b>	<b>0,942</b>	<b>-0,681</b>	<b>0,797</b>	<b>0,684</b>	0,521	<b>0,914</b>	1,000						
<b>Fe</b>	-0,564	-0,294	-0,286	-0,416	-0,276	-0,066	-0,289	-0,271	<b>-0,658</b>	-0,298	-0,325	1,000					
<b>rCl/SO<sub>4</sub></b>	-0,416	<b>-0,774</b>	-0,454	-0,494	<b>-0,785</b>	0,374	-0,466	-0,411	-0,251	<b>-0,645</b>	<b>-0,788</b>	0,392	1,000				
<b>rNa/Cl</b>	0,106	-0,526	-0,446	-0,361	-0,468	<b>0,865</b>	<b>-0,823</b>	-0,306	-0,159	<b>-0,742</b>	-0,515	0,004	0,081	1,000			
<b>rNa/K</b>	0,357	<b>0,877</b>	<b>0,939</b>	0,567	<b>0,673</b>	<b>-0,612</b>	<b>0,771</b>	<b>0,909</b>	<b>0,665</b>	<b>0,701</b>	<b>0,883</b>	<b>-0,694</b>	<b>-0,668</b>	-0,439	1,000		
<b>rCa/Mg</b>	-0,221	<b>-0,663</b>	-0,562	-0,568	<b>-0,601</b>	0,020	-0,203	-0,570	-0,393	-0,349	<b>-0,677</b>	0,308	<b>0,802</b>	-0,173	<b>-0,699</b>	1,000	
<b>rCa/SO<sub>4</sub></b>	-0,267	<b>-0,746</b>	<b>-0,615</b>	<b>-0,724</b>	<b>-0,692</b>	0,099	-0,263	<b>-0,608</b>	-0,508	-0,439	<b>-0,754</b>	0,344	<b>0,772</b>	-0,105	<b>-0,717</b>	<b>0,968</b>	1,000

Los valores en negrita son significativamente diferentes de 0 con un nivel de significación alfa = 0,05

**ANEXO XVII: MATRICES DE CORRELACIÓN ENTRE MUESTRAS DE AGUA-SUELOS Y ROCAS.  
PRIMER Y SEGUNDO MUESTREO.**

ANEXO XVII: MATRICES DE CORRELACIÓN ENTRE AGUAS-SUELOS Y ROCAS. PRIMER Y SEGUNDO MUESTREO

	IV-1 S	IV-1 R	IV-2S	IV-2R1	IV-2R2	IV-3 A	IV-4S	IV-4R1	IV-4R2	IV-5 A	IV-6 S	IV-6 R1	IV-6 R2	IV-7S	IV-7 R	IV-8 S	IV-8 R1	IV-8 R2	IV-9 A
IV-1 S	1																		
IV-1 R	0,822	1,000																	
IV-2S	0,998	0,803	1,000																
IV-2R1	0,984	0,873	0,985	1,000															
IV-2R2	0,976	0,807	0,983	0,990	1,000														
IV-3 A	0,090	0,128	0,066	0,036	-0,006	1,000													
IV-4S	0,976	0,839	0,981	0,996	0,998	-0,003	1,000												
IV-4R1	0,973	0,863	0,975	0,997	0,994	0,000	0,999	1,000											
IV-4R2	0,786	0,946	0,781	0,876	0,842	-0,016	0,868	0,888	1,000										
IV-5 A	0,081	0,128	0,047	0,003	-0,052	0,923	-0,049	-0,045	-0,070	1,000									
IV-6 S	0,980	0,846	0,984	0,998	0,997	0,010	1,000	0,999	0,867	-0,032	1,000								
IV-6 R1	0,976	0,883	0,977	0,998	0,988	0,041	0,994	0,996	0,893	0,008	0,995	1,000							
IV-6 R2	0,778	0,963	0,772	0,864	0,817	0,038	0,846	0,867	0,990	-0,001	0,847	0,884	1,000						
IV-7S	0,991	0,886	0,986	0,990	0,970	0,119	0,976	0,978	0,847	0,118	0,981	0,987	0,846	1,000					
IV-7 R	0,799	0,942	0,796	0,888	0,857	-0,025	0,882	0,900	0,999	-0,082	0,880	0,904	0,988	0,857	1,000				
IV-8 S	0,984	0,736	0,991	0,970	0,986	0,016	0,978	0,968	0,746	-0,018	0,979	0,960	0,722	0,959	0,764	1,000			
IV-8 R1	0,972	0,698	0,981	0,956	0,979	0,004	0,968	0,956	0,717	-0,034	0,968	0,945	0,688	0,942	0,736	0,998	1,000		
IV-8 R2	0,980	0,741	0,988	0,973	0,990	0,006	0,982	0,973	0,762	-0,032	0,982	0,964	0,734	0,958	0,779	0,999	0,998	1,000	
IV-9 A	0,066	0,171	0,033	-0,010	-0,088	0,688	-0,079	-0,074	-0,062	0,884	-0,060	0,005	0,046	0,115	-0,077	-0,062	-0,087	-0,081	1,000
IV-10 A	-0,064	-0,005	-0,093	-0,091	-0,093	0,442	-0,097	-0,093	-0,043	0,637	-0,094	-0,083	-0,058	-0,018	-0,058	-0,095	-0,093	-0,086	0,517
IV-11 S	0,970	0,906	0,968	0,996	0,981	0,032	0,990	0,996	0,911	-0,004	0,992	0,996	0,898	0,985	0,920	0,949	0,932	0,953	-0,018
IV-11 R	0,945	0,943	0,940	0,982	0,955	0,036	0,971	0,981	0,941	0,000	0,974	0,985	0,934	0,973	0,948	0,911	0,888	0,916	-0,001
IV-12 A	-0,088	-0,029	-0,114	-0,106	-0,101	0,430	-0,105	-0,102	-0,042	0,599	-0,104	-0,098	-0,068	-0,043	-0,057	-0,107	-0,103	-0,096	0,445
IV-13S	0,046	0,090	0,014	0,018	0,019	0,389	0,018	0,024	0,053	0,566	0,020	0,019	0,016	0,086	0,040	0,019	0,020	0,029	0,400
IV-13 R1	-0,070	-0,039	-0,065	-0,046	-0,041	0,663	-0,040	-0,038	0,000	0,331	-0,041	-0,043	-0,002	-0,067	0,002	-0,057	-0,055	-0,053	-0,029
IV-13 R2	-0,072	0,006	-0,108	-0,103	-0,109	0,377	-0,107	-0,098	-0,046	0,555	-0,104	-0,105	-0,083	-0,031	-0,062	-0,106	-0,106	-0,097	0,387
IV-14 A	-0,065	0,014	-0,100	-0,098	-0,107	0,417	-0,106	-0,098	-0,047	0,608	-0,102	-0,097	-0,073	-0,021	-0,063	-0,104	-0,105	-0,096	0,461
IV-15S	0,984	0,755	0,984	0,963	0,972	0,104	0,965	0,957	0,744	0,105	0,967	0,953	0,721	0,968	0,758	0,987	0,983	0,986	0,050
IV-15 R	0,987	0,799	0,984	0,974	0,977	0,106	0,974	0,970	0,787	0,107	0,977	0,967	0,765	0,980	0,800	0,982	0,975	0,982	0,055
IV-16S	0,402	0,219	0,384	0,346	0,375	0,366	0,356	0,346	0,197	0,518	0,358	0,339	0,154	0,404	0,197	0,410	0,422	0,415	0,348
IV-17 S	0,278	0,179	0,257	0,238	0,258	0,403	0,244	0,238	0,164	0,572	0,245	0,240	0,131	0,299	0,159	0,274	0,283	0,282	0,420
IV-17 R	0,914	0,521	0,922	0,847	0,880	0,074	0,857	0,836	0,494	0,073	0,859	0,828	0,472	0,856	0,516	0,945	0,955	0,936	0,019
IV-18 A	-0,070	0,007	-0,104	-0,101	-0,108	0,429	-0,108	-0,101	-0,048	0,615	-0,105	-0,099	-0,073	-0,025	-0,064	-0,107	-0,107	-0,099	0,464
IV-19S	0,828	0,370	0,839	0,740	0,784	0,105	0,752	0,723	0,335	0,121	0,755	0,719	0,320	0,756	0,359	0,870	0,887	0,858	0,072
IV-20S	0,867	0,441	0,875	0,785	0,821	0,123	0,793	0,768	0,399	0,142	0,796	0,764	0,383	0,803	0,421	0,900	0,913	0,888	0,093
IV-21S	0,799	0,329	0,811	0,706	0,751	0,121	0,718	0,688	0,291	0,146	0,721	0,684	0,276	0,725	0,314	0,844	0,862	0,830	0,096
IV-22S	0,802	0,332	0,814	0,710	0,756	0,116	0,722	0,692	0,296	0,137	0,725	0,689	0,281	0,728	0,319	0,847	0,866	0,833	0,090
IV-23S	0,982	0,862	0,982	0,997	0,992	0,020	0,997	0,998	0,872	-0,017	0,998	0,993	0,850	0,985	0,884	0,974	0,961	0,977	-0,052

ANEXO XVII: MATRICES DE CORRELACIÓN ENTRE AGUAS-SUELOS Y ROCAS. PRIMER Y SEGUNDO MUESTREO

	IV-10 A	IV-11 S	IV-11 R	IV-12 A	IV-13S	IV-13 R1	IV-13 R2	IV-14 A	IV-15S	IV-15 R	IV-16S	IV-17 S	IV-17 R	IV-18 A	IV-19S	IV-20S	IV-21S	IV-22S	IV-23S
IV-1 S																			
IV-1 R																			
IV-2S																			
IV-2R1																			
IV-2R2																			
IV-3 A																			
IV-4S																			
IV-4R1																			
IV-4R2																			
IV-5 A																			
IV-6 S																			
IV-6 R1																			
IV-6 R2																			
IV-7S																			
IV-7 R																			
IV-8 S																			
IV-8 R1																			
IV-8 R2																			
IV-9 A																			
IV-10 A	1,000																		
IV-11 S	-0,080	1,000																	
IV-11 R	-0,088	<b>0,994</b>	1,000																
IV-12 A	<b>0,995</b>	-0,093	-0,101	1,000															
IV-13S	<b>0,973</b>	0,035	0,027	<b>0,976</b>	1,000														
IV-13 R1	-0,099	-0,041	-0,034	-0,048	-0,103	1,000													
IV-13 R2	<b>0,962</b>	-0,082	-0,084	<b>0,966</b>	<b>0,988</b>	-0,099	1,000												
IV-14 A	<b>0,981</b>	-0,080	-0,082	<b>0,979</b>	<b>0,990</b>	-0,104	<b>0,996</b>	1,000											
IV-15S	0,057	<b>0,944</b>	<b>0,907</b>	0,040	0,167	-0,076	0,042	0,049	1,000										
IV-15 R	0,067	<b>0,962</b>	<b>0,932</b>	0,051	0,180	-0,073	0,058	<b>0,063</b>	<b>0,997</b>	1,000									
IV-16S	<b>0,840</b>	0,332	0,287	<b>0,835</b>	<b>0,885</b>	-0,124	<b>0,818</b>	<b>0,828</b>	0,534	0,527	1,000								
IV-17 S	<b>0,923</b>	0,233	0,200	<b>0,918</b>	<b>0,939</b>	-0,114	<b>0,880</b>	<b>0,897</b>	0,411	0,410	<b>0,980</b>	1,000							
IV-17 R	-0,049	<b>0,803</b>	<b>0,739</b>	-0,071	0,046	-0,087	-0,070	-0,063	<b>0,940</b>	<b>0,913</b>	0,483	0,327	1,000						
IV-18 A	<b>0,986</b>	-0,084	-0,087	<b>0,985</b>	<b>0,990</b>	-0,086	<b>0,993</b>	<b>0,999</b>	0,045	<b>0,059</b>	<b>0,830</b>	<b>0,901</b>	-0,066	1,000					
IV-19S	-0,024	<b>0,683</b>	<b>0,607</b>	-0,049	0,044	-0,092	-0,068	-0,053	<b>0,868</b>	<b>0,829</b>	0,494	0,340	<b>0,982</b>	-0,054	1,000				
IV-20S	0,002	<b>0,733</b>	<b>0,662</b>	-0,025	0,078	-0,096	-0,036	-0,022	<b>0,903</b>	<b>0,869</b>	0,519	0,367	<b>0,991</b>	-0,024	<b>0,997</b>	1,000			
IV-21S	0,007	<b>0,646</b>	0,567	-0,019	0,068	-0,098	-0,042	-0,025	<b>0,845</b>	<b>0,804</b>	0,515	0,364	<b>0,970</b>	-0,026	<b>0,998</b>	<b>0,992</b>	1,000		
IV-22S	-0,008	<b>0,650</b>	0,572	-0,035	0,052	-0,095	-0,059	-0,042	<b>0,846</b>	<b>0,804</b>	0,502	0,350	<b>0,971</b>	-0,043	<b>0,999</b>	<b>0,992</b>	<b>1,000</b>	1,000	
IV-23S	-0,070	<b>0,995</b>	<b>0,979</b>	-0,080	0,053	-0,047	-0,066	-0,067	<b>0,968</b>	<b>0,980</b>	0,376	0,263	<b>0,852</b>	-0,071	<b>0,742</b>	<b>0,787</b>	<b>0,707</b>	<b>0,711</b>	1,000

ANEXO XVII: MATRICES DE CORRELACIÓN ENTRE AGUAS-SUELOS Y ROCAS. SEGUNDO MUESTREO

	IV-1 S	IV-1 R	IV-2S	IV-2R1	IV-2R2	IV-3 A	IV-4S	IV-4R1	IV-4R2	IV-5 A	IV-6 S	IV-6 R1	IV-6 R2	IV-7S	IV-7 R	IV-8 S	IV-8 R1	IV-8 R2	IV-9 A
IG-1 A	-0,003	0,122	-0,042	-0,065	-0,122	<b>0,614</b>	-0,114	-0,106	-0,059	0,858	-0,100	-0,054	-0,002	0,055	-0,077	-0,108	-0,125	-0,115	<b>0,881</b>
IG-1 S	<b>0,655</b>	0,147	<b>0,666</b>	0,535	0,584	0,187	0,544	0,509	0,081	0,246	0,549	0,511	0,076	0,572	0,104	0,700	0,724	0,682	0,203
IG-2 A	0,008	0,058	-0,028	-0,050	-0,074	0,557	-0,075	-0,071	-0,060	0,778	-0,066	-0,045	-0,048	0,052	-0,075	-0,056	-0,061	-0,056	0,696
IG-2 S	<b>0,968</b>	<b>0,921</b>	<b>0,965</b>	<b>0,993</b>	<b>0,971</b>	0,075	<b>0,982</b>	<b>0,988</b>	<b>0,913</b>	0,054	<b>0,985</b>	<b>0,995</b>	0,909	<b>0,989</b>	<b>0,921</b>	<b>0,938</b>	<b>0,918</b>	<b>0,941</b>	0,055
IG-3 A	0,090	0,106	0,053	0,008	-0,030	<b>0,648</b>	-0,032	-0,031	-0,066	0,875	-0,019	0,013	-0,024	0,127	-0,080	0,006	-0,004	-0,003	<b>0,845</b>
IG-4 S	<b>0,702</b>	0,322	<b>0,703</b>	0,586	0,593	0,333	0,566	0,541	0,188	0,432	0,577	0,574	0,229	<b>0,651</b>	0,204	<b>0,689</b>	<b>0,695</b>	<b>0,666</b>	0,480
IG-5 S	<b>0,771</b>	0,387	<b>0,769</b>	<b>0,662</b>	<b>0,675</b>	0,318	<b>0,648</b>	<b>0,625</b>	0,272	0,415	<b>0,658</b>	<b>0,646</b>	0,292	<b>0,722</b>	0,288	<b>0,765</b>	<b>0,772</b>	<b>0,747</b>	0,414
IG-6 S	<b>0,707</b>	0,507	<b>0,679</b>	<b>0,614</b>	<b>0,600</b>	0,409	0,592	0,588	0,360	0,557	<b>0,604</b>	0,595	0,352	<b>0,699</b>	0,363	<b>0,661</b>	<b>0,656</b>	<b>0,651</b>	0,465
IG-7 S	<b>0,723</b>	0,261	<b>0,732</b>	<b>0,610</b>	<b>0,644</b>	0,223	<b>0,609</b>	0,578	0,177	0,286	<b>0,616</b>	0,591	0,188	<b>0,652</b>	0,199	<b>0,748</b>	<b>0,765</b>	<b>0,730</b>	0,278

	IV-10 A	IV-11 S	IV-11 R	IV-12 A	IV-13S	IV-13 R1	IV-13 R2	IV-14 A	IV-15S	IV-15 R	IV-16S	IV-17 S	IV-17 R	IV-18 A	IV-19S	IV-20S	IV-21S
IG-1 A	<b>0,848</b>	-0,059	-0,047	<b>0,799</b>	<b>0,776</b>	-0,130	<b>0,772</b>	<b>0,822</b>	0,045	0,057	<b>0,648</b>	<b>0,735</b>	-0,041	<b>0,822</b>	-0,004	0,027	0,026
IG-1 S	0,088	0,466	0,378	0,055	0,117	-0,112	0,022	0,047	<b>0,715</b>	<b>0,663</b>	0,539	0,401	<b>0,890</b>	0,047	<b>0,959</b>	<b>0,941</b>	<b>0,973</b>
IG-2 A	<b>0,965</b>	-0,044	-0,050	<b>0,939</b>	0,932	-0,107	<b>0,923</b>	<b>0,953</b>	0,103	0,111	<b>0,821</b>	<b>0,891</b>	0,020	<b>0,954</b>	0,054	0,082	0,086
IG-2 S	-0,045	<b>0,997</b>	<b>0,994</b>	-0,062	0,059	-0,047	-0,060	-0,051	<b>0,940</b>	<b>0,959</b>	0,348	0,258	<b>0,792</b>	-0,055	<b>0,676</b>	<b>0,727</b>	<b>0,640</b>
IG-3 A	<b>0,869</b>	0,002	-0,005	<b>0,823</b>	<b>0,813</b>	-0,093	<b>0,796</b>	<b>0,842</b>	0,158	0,159	<b>0,757</b>	<b>0,815</b>	0,109	<b>0,844</b>	0,158	0,184	0,191
IG-4 S	0,105	0,527	0,464	0,047	0,097	-0,125	-0,001	0,047	<b>0,720</b>	<b>0,682</b>	0,481	0,375	<b>0,842</b>	0,047	<b>0,897</b>	<b>0,894</b>	<b>0,908</b>
IG-5 S	0,186	<b>0,607</b>	0,543	0,136	0,210	-0,130	0,106	0,143	<b>0,806</b>	<b>0,772</b>	0,597	0,482	<b>0,900</b>	0,142	<b>0,936</b>	<b>0,941</b>	<b>0,944</b>
IG-6 S	0,541	0,595	0,558	0,503	<b>0,625</b>	-0,155	0,554	0,567	<b>0,762</b>	<b>0,756</b>	<b>0,838</b>	<b>0,756</b>	<b>0,734</b>	0,558	<b>0,717</b>	<b>0,754</b>	<b>0,724</b>
IG-7 S	0,059	0,545	0,467	0,018	0,081	-0,112	-0,022	0,011	<b>0,764</b>	<b>0,718</b>	0,508	0,375	<b>0,912</b>	0,011	<b>0,967</b>	<b>0,956</b>	<b>0,976</b>

	IV-22S	IV-23S	IG-1 A	IG-1 S	IG-2 A	IG-2 S	IG-3 A	IG-4 S	IG-5 S	IG-6 S	IG-7 S
IG-1 A	0,013	-0,076	1,000								
IG-1 S	<b>0,971</b>	0,534	0,131	1,000							
IG-2 A	0,070	-0,039	<b>0,946</b>	0,182	1,000						
IG-2 S	<b>0,644</b>	<b>0,987</b>	0,004	0,466	0,001	1,000					
IG-3 A	0,177	0,003	<b>0,979</b>	<b>0,965</b>	0,058	1,000					
IG-4 S	<b>0,907</b>	0,564	0,314	<b>0,932</b>	0,260	0,551	0,437	1,000			
IG-5 S	<b>0,942</b>	<b>0,651</b>	0,321	<b>0,949</b>	0,317	<b>0,625</b>	0,458	<b>0,983</b>	1,000		
IG-6 S	<b>0,714</b>	<b>0,630</b>	0,583	<b>0,712</b>	<b>0,645</b>	0,614	<b>0,692</b>	<b>0,747</b>	<b>0,835</b>	1,000	
IG-7 S	<b>0,975</b>	<b>0,601</b>	0,162	<b>0,988</b>	0,174	0,552	0,315	<b>0,971</b>	<b>0,978</b>	<b>0,731</b>	1



